

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv řezné rychlosti na přesnost a drsnost
obrobeného povrchu technologií víceosého
frézování**

Effect of Cutting Speed on Accuracy and Surface Roughness
During Multi-Axis Milling

Student:

Bc. Jiří Krejsek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Krejsek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv řezné rychlosti na přesnost a drsnost obrobeneho povrchu
technologií víceosého frézování**
**Effect of Cutting Speed on Accuracy and Surface Roughness during
Multi-Axis Milling**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor jednotlivých 3D parametrů drsnosti obrobeneho povrchu.
2. Porovnání a technický rozbor 3osého a 5osého frézování se zaměřením na přesnost.
3. Analýza obrobeneho povrchu po 3osém a 5osém frézování.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:


SADÍLEK, M., FOJTÍK, F., SADÍLKOVÁ, Z., KOLAŘÍK, K., PETRŮ, J. A Study of Effects of Changing the Position of the Tool Axis to the Machined Surface. *Transaction of FAMENA*. Vol. 39, No. 2, Zagreb 2015, pp.33-46. ISSN:1333-1124.
SADÍLEK, M. *Počítačová podpora výroby*. VŠB – TU Ostrava, 2011, 80 s., Dostupné na: http://www.346.vsb.cz/studijni_literatura.html.
SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivity obrábění s využitím CAD/CAM systému - Disertační práce*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.
HAMOUZ, L. *Softwarová optimalizace obrábění složitých tvarových ploch při práci na čisto s ohledem na ochranu nástroje*. Plzeň, 2003. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

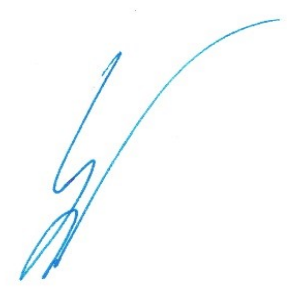
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry

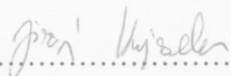



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 19. 5. 2019

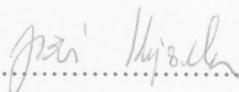


Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představeních a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 19. 5. 2019

.....


Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Krejsek

Adresa trvalého bydliště autora práce: Telecí 227, Telecí, 569 94

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KREJSEK, J. *Vliv řezné rychlosti na přesnost a drsnost obrobeného povrchu technologií víceosého frézování: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 71 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Tato diplomová práce pojednává o vlivu efektivní řezné rychlosti na kvalitu a drsnost obrobeného povrchu technologií víceosého frézování. Hlavním cílem práce je analýza drsnosti povrchů experimentálních vzorků vyrobených metodou 3osého frézování a metodou 5osého frézování, kde je porovnáváno několik skupin naklonění osy nástroje. V teoretické části je zmíněn technický rozbor 3osého a víceosého frézování spolu s popisem vztahů efektivních řezných průměrů a efektivní řezné rychlosti na změně náklonu nástroje, charakteristika profilové drsnosti povrchu a charakteristika plošného hodnocení textury povrchu. V další části práce je popsána příprava a provedení experimentálního měření vzorků s vyhodnocením naměřených dat, na základě kterých je stanoven závěr práce.

ANNOTATION TO MASTER THESIS

KREJSEK, J. *Effect of Cutting Speed on Accuracy and Surface Roughness during Multi-Axis Milling*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 71 p. Thesis head: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

This master thesis deals with influence of the effective cutting speed on quality, texture and roughness of the multi-axis milling machined surface. The main goal of the work is to analyze the surface roughness of experimental samples produced by the 3-axis and 5-axis milling process, where several tool tilt angles are compared. In the theoretical part is mentioned the technical analysis of 3-axis and multi-axis milling together with the description of the effective cutting diameter relationship and the effective speed cutting on the tool tilt geometry change, the surface roughness profile and the characteristic of the surface texture. The next part of the thesis describes the preparation and execution of an experimental measurement of the sample with the evaluation of the measured data, based on which the conclusion of the work is determined.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Úvod	11
1 Analýza a porovnání 3osého a 5osého frézování.....	12
1.1. Frézování tvarových ploch 3osou technologií.....	13
1.2. Frézování tvarových ploch víceosou technologií	14
2 Frézování s ohledem na polohu osy nástroje.....	15
2.1. Frézování bez změny polohy osy nástroje.....	15
2.2. Frézování se změnou polohy osy nástroje.....	16
2.3. Vztah efektivního průměru a efektivní řezné rychlosti	17
3 Charakteristika profilových parametrů drsnosti	22
3.1. Drsnost povrchu.....	22
3.2. Charakteristika parametrů drsnosti	24
4 Charakteristika plošného hodnocení textury povrchu.....	29
4.1. Filtrace povrchu.....	29
4.2. Definice základních topografických prvků a parametrů.....	31
4.3. Parametry pole.....	32
4.3..1. S-parametry	32
4.3..2. V-parametry.....	34
5 Návrh a příprava experimentální části.....	36
5.1. Popis polotovaru a řezné parametry pro frézování.....	36
5.2. Rozdělení frézování vzorků.....	38
5.3. Popis měřicího přístroje Alicona IF	39
5.4. Oblasti měření a vyhodnocované parametry	41

6	Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.....	44
6.1.	Porovnání parametrů v závislosti na změně naklonění nástroje.....	44
6.1..1.	Rovinná plocha (plocha 1).....	45
6.1..2.	Zaoblená plocha (plocha 2)	49
6.1..3.	Sedlová plocha (plocha 3)	54
6.1..4.	Celkové hodnocení z hlediska všech ploch	58
6.2.	Závislost měřených parametrů na efektivní řezné rychlosti.....	59
	Závěr	63
	Poděkování	65
	Použitá literatura	66
	Seznam příloh.....	71

Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Význam	Jednotka
2D	Dvoudimenzionální (dvourozměrné)	[-]
3D	Třidimenzionální (třírozměrné)	[-]
A ₁	Plocha hrotů	[μm]
A ₂	Plocha rýh	[μm]
C ₁	Hladina řezu	[μm]
C ₂	Hladina řezu	[μm]
CNC	Číslicově řízené obráběcí centrum	[-]
F-filtr	Filtr pro odstranění vlivu tvaru	[-]
HSC	Vysokorychlostní obrábění	[-]
IF	Infinite Focus	[-]
L-filtr	Plošný dlouhovlnný filtr	[-]
NC	Číslicové řízení	[-]
Pa	Průměrná aritmetická úchylka základního profilu	[μm]
Pp	Největší výška výstupku základního profilu	[μm]
P-parametr	Parametry základního profilu	[-]
Pq	Průměrná kvadratická úchylka základního profilu	
Pt	Celková výška základního profilu	[μm]
Pv	Největší hloubka prohlubně základního profilu	[μm]
Pz	Největší výška základního profilu	[μm]
R	Poloměr zaoblení nástroje	[mm]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rk	Výška jádra profilu drsnosti	[μm]
Rku	Špičatost posuzovaného profilu	[-]
R _{max}	Maximální vzdálenost řezu od středu centrálního vrcholu	[μm]
R _{min}	Minimální vzdálenost řezu od středu centrálního vrcholu	[μm]
Rp	Největší výška výstupku profilu	[μm]
R-parametr	Parametry profilu drsnosti	[-]
Rpk	Redukovaná výška výstupků	[μm]
Rq	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rsk	Šikmost posuzovaného profilu	[-]
Rsm	Průměrná vzdálenost prvků profilu	[μm]

Rt	Celková výška profilu	[μm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
Rvk	Redukovaná hloubka prohlubně	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
R Δ q	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	[-]
Sa	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	[μm]
Sal	Délka autokorelace	[μm]
Sdq	Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu	[-]
Sdr	Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu	[%]
S-F povrch	Povrch po aplikaci S-filtru a F-operace	[-]
S-filtr	Plošný krátkovlnný filtr	[-]
Sk	Výška jádra	[μm]
Sku	Špičatost omezené stupnice povrchu	[-]
S-L povrch	Povrch po aplikaci S-filtru a F-operace	[-]
Smq	Poměr materiálu	[%]
Smr	Poměr materiálu	[%]
Smr1	Poměr materiálu na rozhraní vrchů a jádra	[%]
Smr2	Poměr materiálu na rozhraní jádra a údolí	[%]
Sp	Maximální výška piku omezené stupnice povrchu	[μm]
S-parametr	Plošné parametry	[-]
Spk	Redukovaná výška piku	[μm]
Spq	Základ průměrné úchyly čtverců	[μm]
Sq	Základ průměrné výšky čtverce omezené stupnice povrchu	[μm]
Ssk	Šikmost omezené stupnice povrchu	[-]
Std	Směr textury omezené stupnice povrchu	[°]
Str	Poměr aspektu textury	[-, %]
Sv	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	[μm]
Svk	Redukovaná hloubka údolí	[μm]
Svq	Základ průměrné úchyly čtverců údolí	[μm]
Sxp	Extrémní výška piku	[μm]
Sz	Maximální výška omezené stupnice povrchu	[μm]
Vmc	Jádro objemu materiálu omezené stupnice povrchu	[$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
Vmp	Pik objemu materiálu omezené stupnice povrchu	[$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]

V-parametr	Objemové parametry	[-]
V_{vc}	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu	$[ml \cdot m^{-2}]$
V_{vv}	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu	$[ml \cdot m^{-2}]$
W-parametr	Parametry profilu vlnitosti	[-]
W_t	Celková výška profilu vlnitosti	$[\mu m]$
X_s	Šířka prvků profilu v rozsahu základní délky	$[mm]$
$Z(x)$	Hodnoty pořadnic v rozsahu základní délky	$[\mu m]$
Z_p	Výška nejvyššího výstupku v rozsahu základní délky	$[\mu m]$
Z_v	Hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky	$[\mu m]$
a_e	Pracovní záběr při frézování – radiální hloubka řezu	$[mm]$
a_p	Hloubka záběru třísky – axiální hloubka řezu	$[mm]$
d	Průměr frézy	$[mm]$
d_{eff}	Efektivní průměr frézy	$[mm]$
dX	Pořadnice sklonů	$[\mu m]$
dZ	Pořadnice sklonů	$[\mu m]$
f_{min}	Minimální posuv	$[mm \cdot min^{-1}]$
f_z	Posuv na zub	$[mm]$
l_n	Vyhodnocovaná délka	$[mm]$
l_r	Základní délka	$[mm]$
n	Otáčky	$[min^{-1}]$
s_o	Posuv po odjetí	$[mm \cdot min^{-1}]$
s_p	Přisuv	$[mm \cdot min^{-1}]$
v_c	Řezná rychlost	$[m \cdot min^{-1}]$
v_{ceff}	Efektivní řezná rychlost	$[m \cdot min^{-1}]$
v_f	Posuvová rychlost	$[mm \cdot min^{-1}]$
β_f	Úhel naklopení ve směru posuvu	$[^\circ]$
β_n	Úhel naklopení ve směru kolmém na posuv	$[^\circ]$
λ	Vlnová délka	$[nm]$
λ_c	Mezní vlnová délka	$[nm]$
λ_f	Vlnová délka dlouhovlnného filtru profilu	$[nm]$
λ_s	Vlnová délka krátkovlnného filtru profilu	$[nm]$

Úvod

Obrábění je technologický proces, při kterém dochází ke vzniku přesně požadovaných tvarů a rozměrů výrobků při dodržování určité jakosti. Jednou z nejdůležitějších součástí tohoto procesu je v současné době frézování, a to jednoduchých nebo tvarově složitých součástí.

Zejména frézování tvarově složitých součástí, kterým se tato práce zabývá, prošlo v poslední době velkým rozvojem. Ještě v nedávné době bylo zapotřebí frézování složitých tvarů provádět pomocí více upnutí, protože u klasického 3osého frézování se do některých míst bez náklonu nástroje nelze dostat. Proto s rozvojem techniky přichází víceosé frézování. Pomocí víceosého frézování jsme dnes schopni obrábět velice složité tvary, jako zápustky nebo formy, na jedno upnutí.

Řada publikací týkající se problematiky víceosého frézování potvrzuje výhody 5osého frézování oproti klasickému 3osému. Jedná se o výhody, jako je snížení celkového času výroby, snížení počtu upnutí (chyby při seřizování) a hlavně zlepšení kvality obrobeného povrchu.

A právě na jakost povrchu je v současné době kladen mnohem větší důraz, než tomu bylo dříve. Proto je stále zapotřebí se touto problematikou zabývat a zkoumat vlivy jednotlivých parametrů víceosého frézování, které nám mohou kvalitu daného povrchu ovlivňovat.

Jedním z těchto parametrů ovlivňující kvalitu povrchu je řezná rychlost, jejímž vlivem se zabývá tato diplomová práce. Z důvodu naklonění nástroje dochází ke změně efektivního průměru frézy, a tak je ovlivněna i efektivní řezná rychlost.

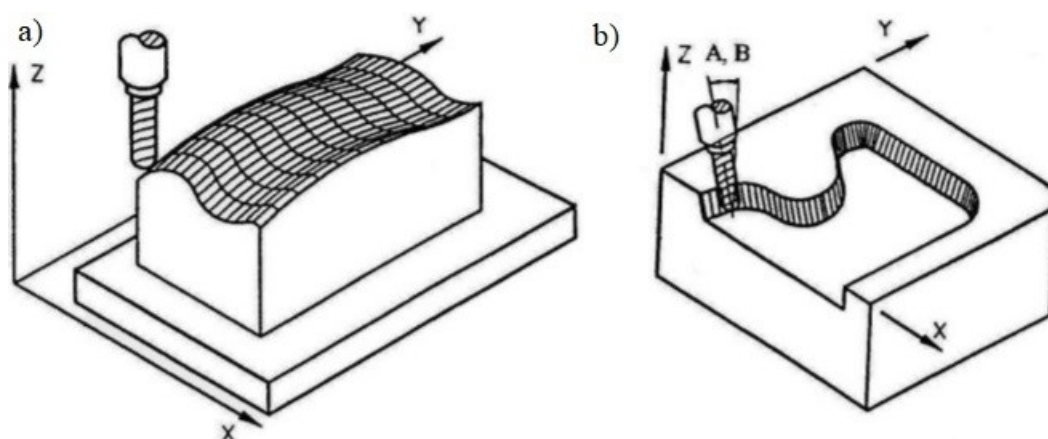
K hodnocení kvality povrchu byla použita bezdotyková metoda pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus, která nám umožňuje nejen klasické hodnocení povrchu, kterým je hodnocení pomocí profilových parametrů (např. R_a , R_z), ale také komplexnější hodnocení kvality, kde se pracuje s využitím takzvaných plošných a objemových parametrů. Tato prostorová analýza nám umožňuje nové možnosti v hodnocení struktury povrchu, a tím dochází k lepšímu a přesnějšímu poznání jeho stavu a vlivu na funkčnost.

1 Analýza a porovnání 3osého a 5osého frézování

V současnosti je jednou z běžných technologií takzvané prostorové obrábění nepravidelných ploch. Tento proces obrábění může být řízen, vyžaduje-li to tvar obráběné součásti, současně (simultánně) ve třech osách, kterými jsou většinou osy X, Y a Z. Tímto způsobem lze obrábět technologicky jednoduché, ale i tvarově náročné plochy, které mají prostorově nepravidelné tvary. Ovšem existuje řada prostorově složitých ploch, které touto metodou obrábět nelze. U těchto ploch je nutné použít mnohem progresivnější a produktivnější technologii, jakou je technologie víceosého obrábění^{1, 8, 21}.

Proces třískového obrábění u metody víceosého frézování může být řízen, vyžaduje-li to tvar obráběné součásti, současně ve více osách, obvykle v pěti. Jedná se tedy o obrábění technologicky jednoduchých, ale i velmi tvarově složitých (zborcených) ploch prostorově nepravidelných tvarů, které často bývají matematicky velmi obtížně definovatelné^{1, 8, 21}.

Další progresivní technologií, která řeší mnohé problémy konvenčního třískového obrábění u těchto velmi složitě tvarových ploch, je vysokorychlostní obrábění označované jako *HSC*. Úkolem této progresivní technologie je snížit cenu výrobku při snížení energetické náročnosti, a to při zvýšení jeho kvality. Použití obou zmíněných technologií současně se nevylučuje, spíše naopak^{1, 8, 21}.

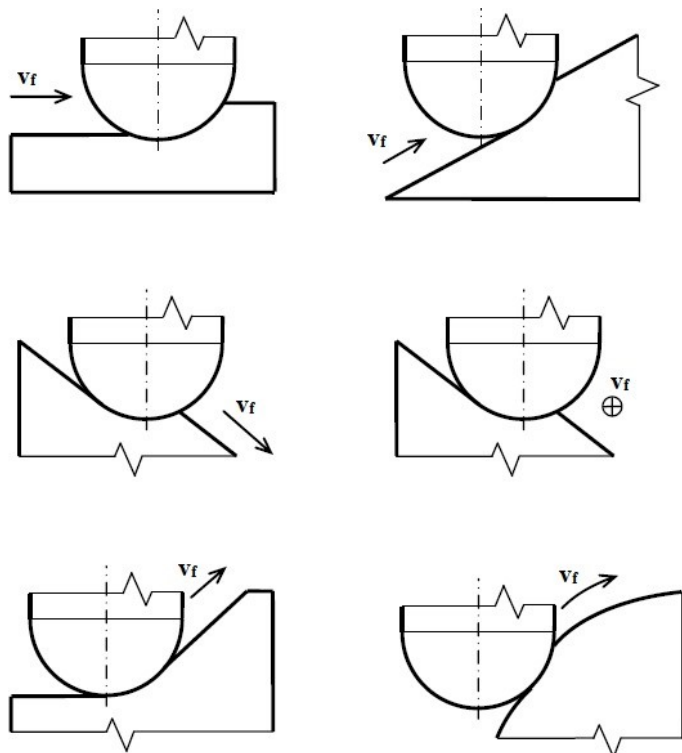


Obrázek 1.1 – Technologie obrábění, a) 3osé frézování, b) 5osé frézování²

1.1. Frézování tvarových ploch 3osou technologií

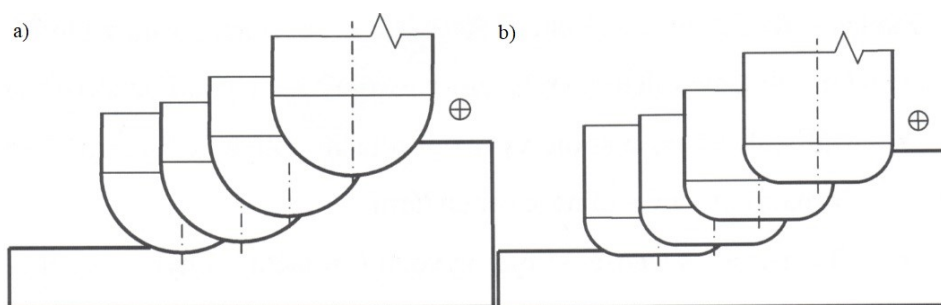
Frézování pomocí třech os, které je také nazýváno kopírovací frézování, je běžný způsob CNC obrábění tvarových ploch. Nástroj se u této technologie pohybuje současně ve třech směrech, a je tak prováděno na tzv. tříosých CNC obráběcích strojích (tříosých frézovacích centrech) ^{1, 8, 21}.

Na následujícím obrázku jsou znázorněny příklady obrábění kulovou frézou s naznačením směru posuvu nástroje (obrázek 1.2) ³.



Obrázek 1.2 – Příklady obrábění tvarových ploch kulovou frézou ⁴

U tříosého frézování tvarových ploch při použití kulové nebo stopkové frézy s rádiusem v rohu dochází vlivem velikosti šířky řezu, rádiusu nástroje a zakřivení povrchu ke vzniku výstupků na obrobeném povrchu (Obrázek 1.3 – Obrábění tvarové plochy) ¹.



Obrázek 1.3 – Obrábění tvarové plochy, a) kulovou frézou, b) stopkovou frézou s rádiusem ²²

1.2. Frézování tvarových ploch víceosou technologií

Víceosé frézování zahrnuje technologie, při kterých je použito více jak tří os. V obecném podvědomí je tato technologie známa jako frézování ve více jak třech osách současně, avšak pro definici víceosého frézování není podmínkou současný pohyb ve zmiňovaných osách. Nejpoužívanější technologií víceosého frézování je označováno 5osé, ale může jím být také frézování 4osé. Tato frézování se provádějí na tzv. víceosých CNC obráběcích strojích ^{1, 6}.

Frézování v pěti osách je velice progresivní technologie CNC obrábění tvarových ploch. Při plynulém obrábění touto metodou se nástroj může pohybovat současně v pěti osách, a je tedy možné obrábět plochu s jakoukoli orientací. To lze provádět plynulým natáčením vřeteníku, natáčením obrobku nebo rozdělením natáčení mezi vřeteníkem a obrobkem ¹.

Kinematikou víceosých strojů je pohyb jednotlivých částí obráběcího stroje. Lineární pohyby jsou realizovány podle os X, Y, a Z. U metody víceosého obrábění jsou k pohybům v těchto osách přidány pohyby rotačních os A, B a C. Podle toho, která část stroje vykonává pohyb v rotačních osách, rozeznáváme různé koncepce obráběcích strojů, kterými jsou například stůl-stůl, stůl-stůl-kolíbka, hlava-stůl nebo hlava-hlava ⁷.

U víceosého obrábění je důležité zmínit tzv. **indexování**. Existuje mnoho různých typů obráběcích strojů (center), které mohou současně obrábět ve třech osách, a v dalších dvou osách je umožněno polohování součásti pouze mimo samotný řez. Tento příklad obrábění je označován jako 3+2osé. Při tříosém frézování používá obráběcí stroj tři lineární osy, zatímco při 5osém polohovém obrábění jsou přidány další dvě rotační osy. Obrábění 3+2osé používá tři lineární osy, které jsou ovládány společně a dvě osy rotační, které slouží k přesunu hlavy (obrobku) na novou pozici. V momentě, kdy je hlava v nové pozici, provádí se klasické tříosé obrábění. Tento typ umožňuje pouze pohyb v lineárních osách nebo v rotačních, což znamená, že nelze provádět lineární a rotační pohyby zároveň ^{1,3}.

Metodou indexování je vyráběno mnoho součástí, avšak pro typ výroby, jako je například výroba forem a zápuštěk, není tato metoda velmi efektivní. Tato metoda je naopak výhodná pro hrubovací fáze výrobního procesu, a proto je při hrubování doporučováno zablokovat rotační osy, díky čemuž je dosaženo větší tuhosti než při simultánním obrábění, a tím je metoda indexování při hrubování považována za přesnější než simultánní obrábění ve více osách ^{1,3}.

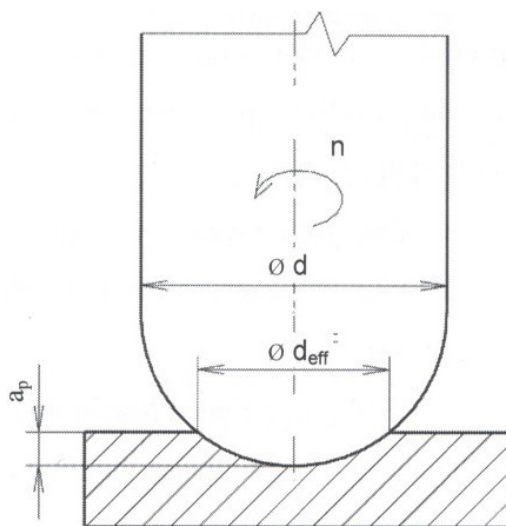
2 Frézování s ohledem na polohu osy nástroje

Daná kapitola popisuje způsoby frézování s ohledem na polohu osy nástroje vůči obrobku, dále popisuje změny a vztahy efektivních průřezů a efektivních řezných rychlostí na základě dané změny polohy osy nástroje.

2.1. Frézování bez změny polohy osy nástroje

U frézování kulovými frézami bez změny polohy osy nástroje (*obrázek 2.1*), při kterém obráběná plocha a nástroj svírají pravý úhel (90°), je na kulovém ostří v ose frézy nulová řezná rychlost v_c , přičemž v tomto místě fréza pouze zatlačuje materiál obrobku. Tím dochází k řadě nežádoucích vlivů, kterými je např. přechování třísky, zvyšování teploty řezání nebo zvýšená tvorba nárustků. Tyto nežádoucí jevy mají za následek zhoršení funkčních vlastností obráběného povrchu nebo snížení trvanlivosti řezného nástroje ^{1,3}.

U obrábění bez možnosti změny polohy osy nástroje také dochází k podstatnému snižování efektivní řezné rychlosti v_{ceff} . Dochází tak z důvodu nulového úhlu naklopení ve směru posuvu β_f a nulového úhlu naklopení ve směru kolmém na posuv β_n , což ovlivňuje, respektive snižuje, efektivní průměr frézy d_{eff} . Vztahy mezi těmito parametry jsou vysvětleny (*kapitola 2.3 Vztah efektivního průměru a efektivní řezné rychlosti*) ^{1,3}.

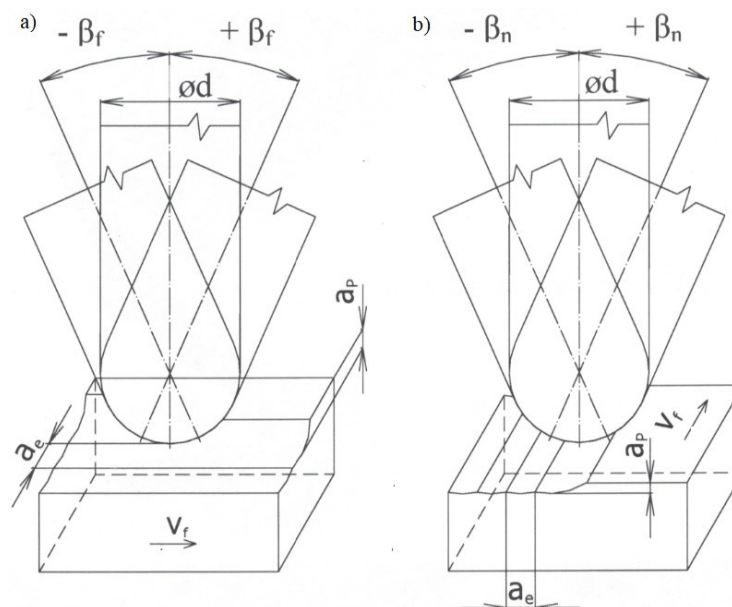


Obrázek 2.1 – Znázornění d_{eff} frézy při standardním frézování ³

Výše zmíněné nežádoucí jevy lze eliminovat, popřípadě úplně vyloučit, právě naklopením osy nástroje nebo nakloněním obrobku popisované v následující podkapitole (*kapitola 2.2 Frézování se změnou polohy osy nástroje*) ¹.

2.2. Frézování se změnou polohy osy nástroje

V praxi je často používán výraz naklopení nástroje, avšak obecně lepším termínem je poloha osy nástroje vzhledem k obráběnému povrchu, a to z důvodu, že náklon nemusí být prováděn pouze z pohledu nástroje, ale může docházet k náklonu obrobku, a to dle koncepce obráběcího stroje³.



Obrázek 2.2 – Způsoby naklopení nástroje, a) naklopení ve směru posuvu, b) naklopení ve směru kolmém na posuv⁸

V praxi jsou na základě polohy osy nástroje ve směru posuvu známy dva způsoby, jak lze obrábět. Tyto způsoby se označují jako tlačенý a таžený nástroj. Při posuvu nástroje označovaným jako таžení, což znamená, že nástroj je naklopen se směrem pohybu, dochází ke zlepšení kvality obrobeného povrchu a nástroj má tišší chod. U druhého způsobu, tedy tlačенého nástroje, což znamená, že je nástroj naklopen na opačnou stranu, než je směr pohybu, nejsou zmiňovaná zlepšení jako u таženého nástroje pozorována. V obou případech se změny polohy osy nástroje ve směru posuvu mohou kombinovat s naklopením ve směru kolmém na posuv³.

2.3. Vztah efektivního průměru a efektivní řezné rychlosti

Při frézování bez změny polohy osy nástroje, kdy jsou úhly naklopení ve směru posuvu i ve směru kolmém na posuv nulové ($\beta_f=0$, $\beta_n=0$), je zjevné, že efektivní neboli skutečný průměr nástroje, který odebírá třísku, je závislý pouze na hloubce řezu a_p a na poloměru zaoblení nástroje R . S malými hloubkami dochází k významnému snižování efektivního průměru řezání d_{eff} , a v důsledku toho je snižována i efektivní řezná rychlost^{9, 13}.

Vztah stanovující efektivní průměr frézy při frézování bez změny polohy osy nástroje:¹⁰

$$d_{eff} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (d - a_p)} \quad [\text{mm}] \quad (2.3.1)$$

kde: d_{eff} efektivní (skutečný) průměr frézy [mm],

a_p axiální hloubka řezu [mm],

d průměr frézy [mm].

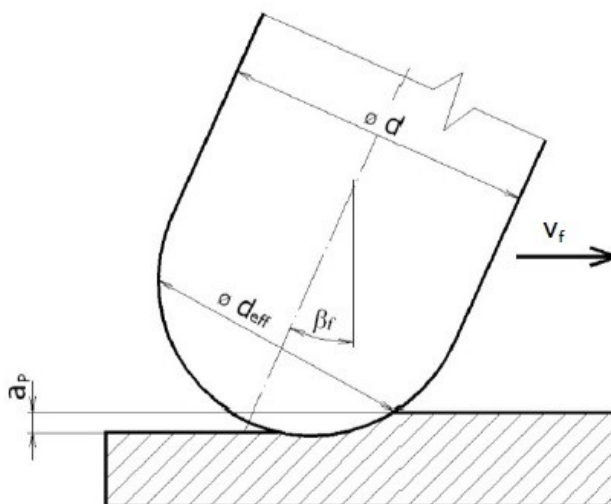
Při změně polohy osy nástroje dochází ke zvýšení efektivního průměru frézy, a tím i ke zvýšení efektivní řezné rychlosti. Zatímco u frézování bez změny polohy osy nástroje je efektivní průměr, respektive efektivní řezná rychlost, v bodě dotyku s obráběným povrchem nulová, u frézování se změnou polohy osy nástroje jsou tyto parametry v daném bodě nenulové. Pomocí této vlastnosti je možné provedení efektivnějšího frézování se současným zlepšením kvality povrchu, změny silového působení, prodloužení trvanlivosti nástroje a snížení chvění technologické soustavy stroj-nástroj-obrobek-přípravek^{11, 13}.

Velikost efektivního průměru při frézování se změnou polohy osy nástroje není už pouze závislá na průměru nástroje a hloubce řezu, ale současně bude dalším ovlivňujícím faktorem úhel vyklonění^{9, 13}.

Vztah stanovující efektivní průměr frézy při frézování s nakloněním osy nástroje ve směru posuvu (taženým nástrojem): ¹⁰

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) + \beta_f \right] \quad [\text{mm}] \quad (2.3.2)$$

kde: d_{eff} efektivní (skutečný) průměr frézy [mm],
 d průměr frézy [mm],
 a_p axiální hloubka řezu [mm],
 β_f úhel naklonění nástroje ve směru posuvu [°].

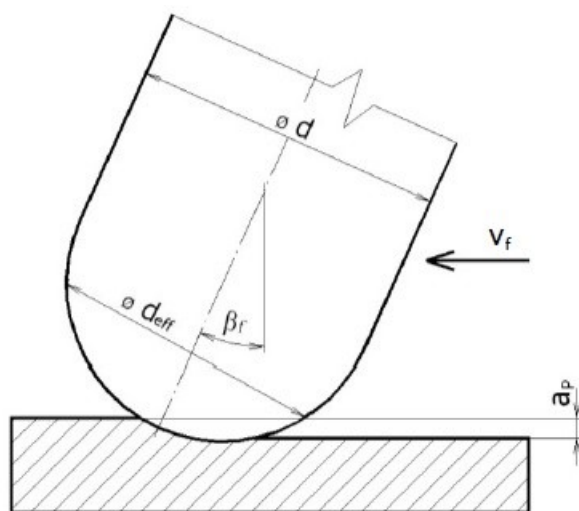


Obrázek 2.3 – Naklonění nástroje ve směru posuvu (Tažený nástroj) ¹³

Vztah stanovující efektivní průměr frézy při frézování s nakloněním osy nástroje proti směru posuvu (tlačeným nástrojem): ¹⁰

$$d_{eff} = d \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) - \beta_f \right] \quad [\text{mm}] \quad (2.3.3)$$

kde: d_{eff} efektivní (skutečný) průměr frézy [mm],
 d průměr frézy [mm],
 a_p axiální hloubka řezu [mm],
 β_f úhel naklonění nástroje ve směru posuvu [°].



Obrázek 2.4 – Naklonění nástroje proti směru posuvu (Tlačený nástroj) ¹³

Vztah pro stanovení efektivní řezné rychlosti, který platí pro případ 3osého i 5osého frézování: ¹⁰

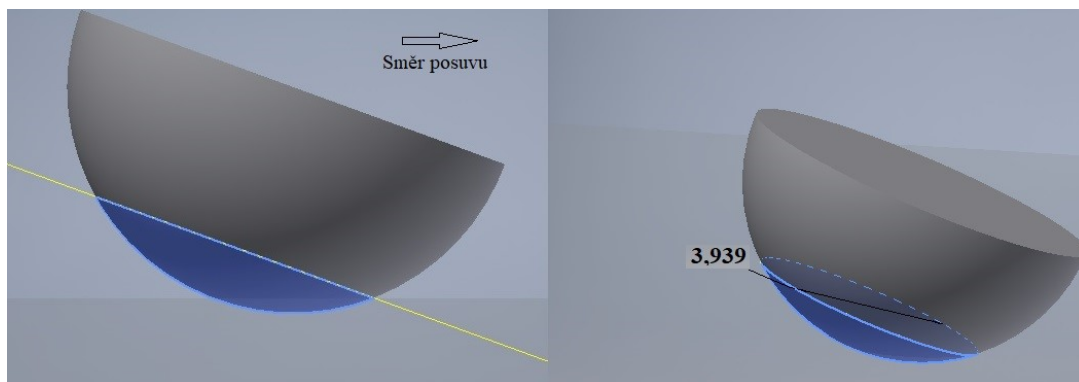
$$v_{ceff} = \frac{\pi \cdot n \cdot d_{eff}}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.3.4)$$

kde: v_{ceff} efektivní (skutečná) řezná rychlost $[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$,

n otáčky frézy $[\text{min}^{-1}]$,

d_{eff} efektivní (skutečný) průměr frézy $[\text{mm}]$.

Výše zmíněné vztahy pro efektivní průměr frézy se týkají pouze změny úhlu naklonění nástroje ve směru posuvu β_f , ale jak už bylo popsáno v předchozí kapitole, tento úhel lze kombinovat s úhlem naklonění ve směru kolmém na posuv β_n . Tento problém je řešen tak, že se při výpočtu aplikuje úhel, který nabývá větší hodnoty. Podle grafického zobrazení však dochází v hodnotách efektivního průměru ke změnám. Proto je zapotřebí se tomuto problému více věnovat a zjistit, k jakým rozdílům ve velikosti efektivního řezného průměru a následně v efektivní řezné rychlosti u jednotlivých náklonů dochází, a určit, jestli jsou tyto hodnoty zanedbatelné či nikoli.



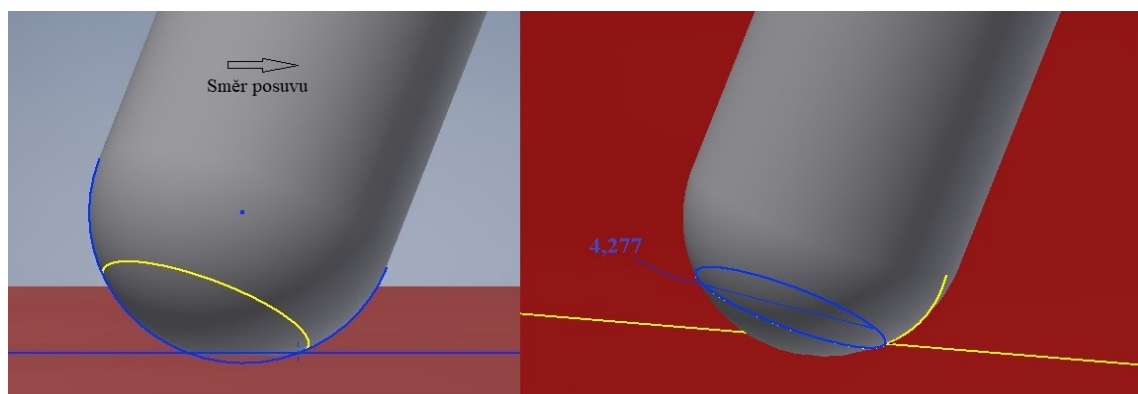
Obrázek 2.5 – Grafické znázornění efektivního průměru frézy d_{eff} ($\beta_f=20^\circ$, $\beta_n=0^\circ$)

Na předchozím obrázku (Obrázek 2.5) je grafické znázornění efektivního řezného průměru nástroje při naklonění ve směru posuvu $\beta_f = 20^\circ$ a naklonění ve směru kolmém na posuv $\beta_n = 0^\circ$. Výsledná hodnota tohoto průměru je v grafickém řešení totožná s vypočtenou hodnotou podle vztahu (2.3.2). Shoduje se tedy i hodnota efektivní řezné rychlosti, jejíž výpočet je proveden podle vztahu (2.3.4).

Tabulka 2.1 – Porovnání hodnot při náklonu $\beta_f=20^\circ$, $\beta_n=0^\circ$

	Efektivní průměr d_{eff}	Efektivní rychlost v_{ceff}
	[mm]	[m·min ⁻¹]
Grafické řešení	3,939	216,56
Výpočetní metoda	3,939	

Po potvrzení shodnosti grafického řešení s výpočetní metodou bylo tentokrát vytvořeno grafické řešení při změně úhlu ve směru kolmém na posuv β_n , a to z 0° na 20° .



Obrázek 2.6 - Grafické znázornění efektivního průměru frézy d_{eff} ($\beta_f=20^\circ$, $\beta_n=20^\circ$)

Na (obrázek 2.6) je znázorněn efektivní řezný průměr nástroje při zachování stejného úhlu naklonění ve směru posuvu $\beta_f = 20^\circ$, ale tentokrát se změnou náklonu ve směru kolmo na směr posuvu, a to $\beta_n = 20^\circ$. Pokud se uvažuje, že výpočetní řešení dle vztahu (2.3.2) bude provedeno pomocí dosazení většího úhlu, tedy 20° , pak se vypočtená hodnota bude shodovat s předchozí variantou, zatímco u grafického řešení je patrná změna efektivního průměru frézy o několik desetin milimetru.

Tabulka 2.2 – Porovnání hodnot při náklonu $\beta_f=20^\circ, \beta_n=20^\circ$

	Efektivní průměr d_{eff}	Efektivní rychlost v_{ceff}
	[mm]	[m·min ⁻¹]
Grafické řešení	4,277	235,14
Výpočetní metoda	3,939	216,56
Rozdíl hodnot	0,338	18,58
Rozdíl [%]	7,9	

Z důvodu možné nepřesnosti při konstrukci grafického řešení by bylo zapotřebí ověření správnosti grafického řešení, například sestavením vztahu pro výpočet efektivního řezného průměru, kde by byly aplikovány oba úhly náklonu. Z tohoto důvodu je grafické řešení pouze informativní a v experimentální části práce je použit klasický výpočet podle vztahu (2.3.2).

3 Charakteristika profilových parametrů drsnosti

Žádný opracovaný povrch není geometricky dokonale rovinný. Tyto odchylky vznikají při přípravě povrchu a vznikají působením vnějších sil nebo vlivem prostředí. Rozlišují se čtyři druhy nerovností: ³³

Mimořádné nerovnosti, (makronerovnosti) – jedná se o trhliny, náhodné nerovnosti odlitků a výkovků, jsou to nepravidelné rýhy.

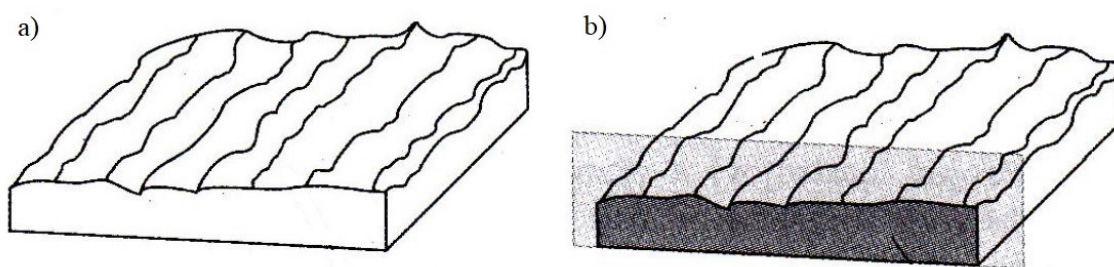
Vlnitost povrchu – jedná se o periodicky se opakující nerovnosti, které vznikají hlavně při obrábění chvěním stroje, nástroje a obráběné součásti.

Drsnost povrchu, (mikronerovnosti) – je pravidelně se opakující a podmíněna technologickým pochodem.

Ultramikronerovnosti – jsou dány snahou dosáhnout nejstabilnějšího stavu krystalického povrchu.

3.1. Drsnost povrchu

Při jakékoli technologické metodě, která slouží k vytvoření technické povrchové plochy (obrobené plochy), dochází ke vzniku nerovností, které mají vliv na funkci těchto ploch. Tyto nerovnosti vytvářejí na povrchu prostorový útvar, který je velmi složitý na posouzení. Kvůli této složitosti se provádí redukce do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obrázek 3.1), kde je získán profil, který slouží pro zjištění základních informací pro hodnocení textury povrchu ^{17, 18}.



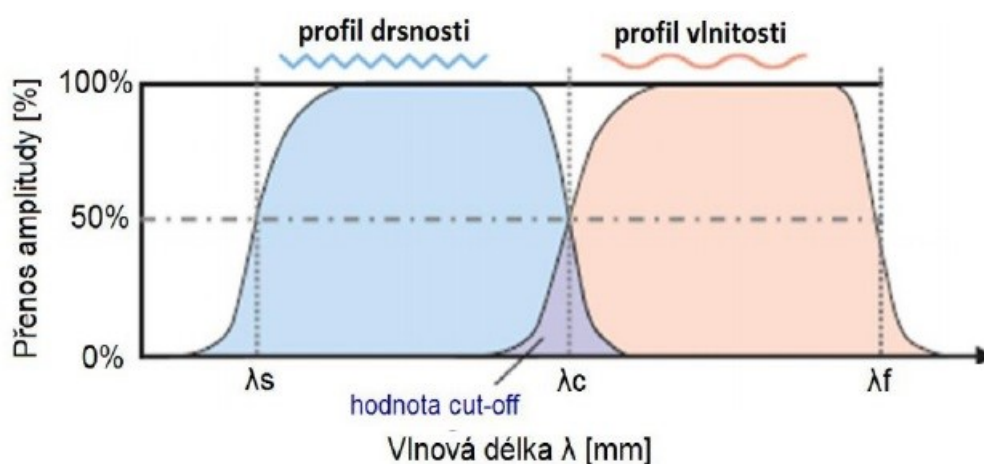
Obrázek 3.1 – Profil povrchu, a) Reálný povrch, b) Kolmý řez ¹⁷

Pro získání základních číselných hodnot z profilu povrchu se uplatňují základy tvořené použitým typem filtru, které slouží k oddělení frekvenčních složek nerovnosti povrchu. Jedná se o složky signálu různých vlnových délek, které přísluší základnímu profilu, profilu vlnitosti povrchu a drsnosti povrchu ¹⁷.

V přístrojích pro měření drsnosti, vlnitosti a základních profilů se používají tři filtry, které rozdělují profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky, a k jejich definování slouží norma ČSN EN ISO 16610-21. Tyto filtry mají stejné přenosové charakteristiky, ale rozdílné hodnoty vlnové délky ^{14, 18}.

Rozdělení filtrů podle normy ČSN EN ISO 16610-21: ^{18, 19}

- **Filtr profilu λ_s** slouží k určení rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu,
- **Filtr profilu λ_c** slouží k určení rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí,
- **Filtr profilu λ_f** slouží k určení rozhraní mezi složkami vlnitosti a delšími složkami vln přítomnými na povrchu (Obrázek 3.2).

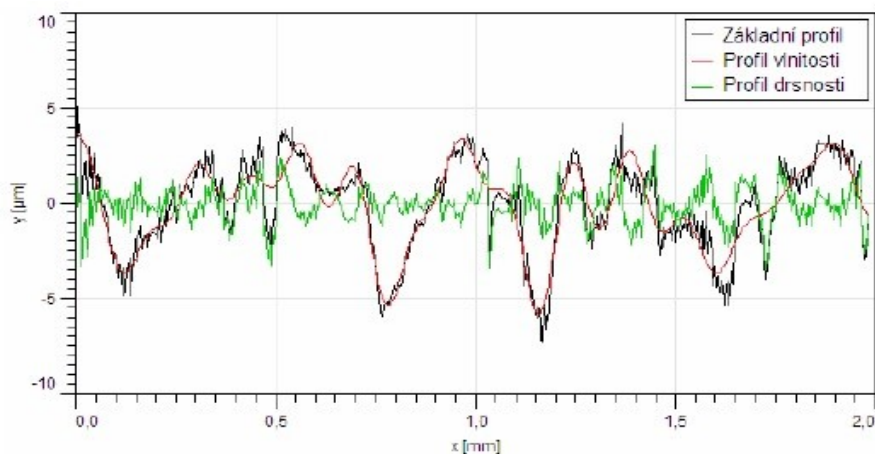


Obrázek 3.2 – Charakteristika profilových filtrů ²⁰

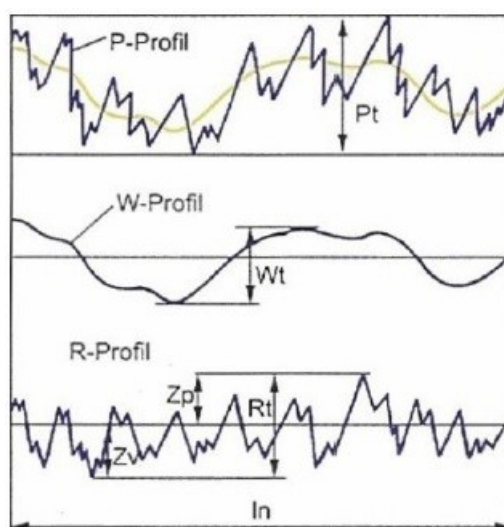
Základní profil, P profil (Primary Profile) – profil, který vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny ³¹.

Profil drsnosti, R profil (Roughness Profile) – profil, který je odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ³¹.

Profil vlnitosti, W profil (Waviness Profile) – profil, který je odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c ³¹.



Obrázek 3.3 – Znáznornění různých vlnových délek³²



Obrázek 3.4 – Parametry P , W , R na profilu povrchu³⁴

3.2. Charakteristika parametrů drsnosti

Drsnost povrchu charakterizují jednotlivé normalizované parametry drsnosti. Mezi nejpoužívanější parametry pro hodnocení drsnosti povrchu patří: ^{14, 36}

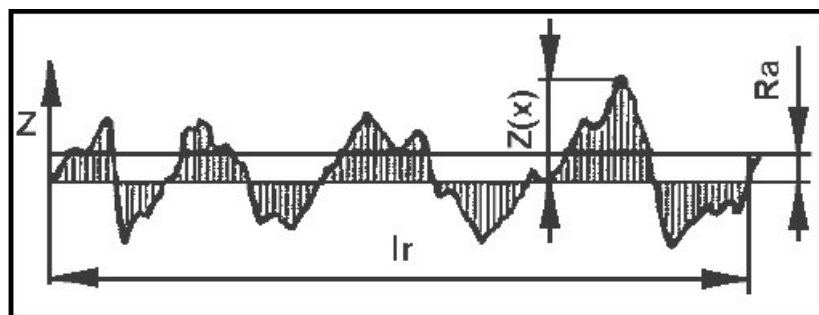
- Průměrná aritmetická úchylka Ra
- Největší výška profilu Rz
- Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq
- Celková výška profilu Rt
- Nejvyšší výška výstupku profilu Rp
- Největší hloubka prohlubně profilu Rv

Pro vysvětlení charakteristik parametrů drsnosti je zapotřebí znát základní pojmy, kterými jsou například **Základní délka** – její označení je l_r , je to délka ve směru osy X, která se používá pro rozpoznání nerovností charakterizující daný profil. Tato hodnota je číselně rovna hodnotě filtru λ_c . Dále **Vyhodnocovaná délka** – značí se l_n , je to délka ve směru osy X, která slouží pro posuzování hodnoceného profilu. Může zahrnovat jednu nebo i více základních délek. **Hodnota pořadnice** – výška vyhodnocovaného profilu v kterékoli poloze X a označuje se $Z(x)$ ³⁶.

Parametr drsnosti R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Ačkoli tento parametr přesně nevypovídá o dané drsnosti, protože citlivě nereaguje na extrémní výšky a hloubky profilu, je pro srovnání ploch, které jsou vytvořeny podobnými nebo stejnými metodami a podmínkami dostačující. Patří mezi nejpoužívanější parametr pro posuzování (Obrázek 3.5) ^{35, 36}.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (3.2.1)$$

kde: $Z(x)$ výška posuzovaného profilu v libovolném poloze x [μm],
 l_r základní délka profilu [mm] ³⁶.

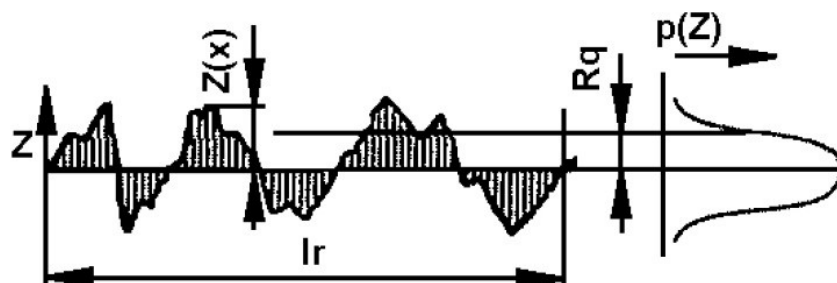


Obrázek 3.5 – Parametr drsnosti R_a ³⁶

Parametr drsnosti R_q – je průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Tento parametr je podobný jako parametr R_a , ale je citlivější na výskyt výstupků a prohlubní. Je vhodný pro hodnocení jemně obrobených ploch (Obrázek 3.6) ^{35, 36}.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.2.2)$$

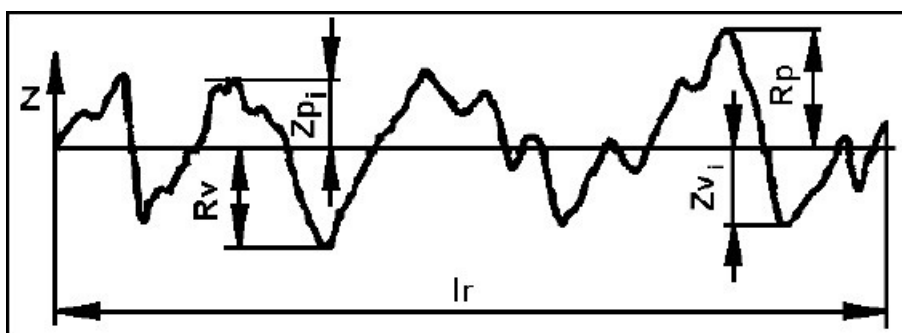
kde: $Z(x)$ výška posuzovaného profilu v libovolném poloze x [μm],
 lr základní délka profilu [mm] ³⁶



Obrázek 3.6 – Parametr drsnosti Rq ³⁶

Parametr drsnosti Rt – je součet výšky nejvyššího výstupku Zp a hloubky nejnižší prohlubně Zv v rozsahu vyhodnocované délky ln . Tento parametr je velmi proměnlivý s nestálou hodnotou, která je ovlivňována i jednotlivými rýhami a nečistotami. Je významný především u vysoce namáhaných součástí ^{35, 36}.

Parametry drsnosti Rp a Rv – parametr Rp je výška nejvyššího výstupku Zp v rozsahu délky lr a je důležitý pro hodnocení procesů tření a opotřebení, zatímco parametr Rv je nejnižší hloubka prohlubně profilu Zv v rozsahu základní délky lr . Tento parametr je důležitý z hlediska udržení maziva na povrchu, proto jsou tyto prohlubně v některých případech žádoucí. Ve většině případů jsou ovšem tyto prohlubně nejčastějším místem vzniku trhlin a koroze (Obrázek 3.7) ^{35, 36}.



Obrázek 3.7 – Parametry drsnosti Rp a Rv ³⁶

Parametr drsnosti R_z – parametr R_z je součet výšky největšího výstupku Z_p a hloubky nejnižší prohlubně Z_v , tedy ($R_z = R_p + R_v$), v rozsahu základní délky l_r . Tento parametr je podobný parametru R_t , ale jeho hodnota je stálejší, protože není tak citlivá na vnější vlivy jako jsou rýhy a nečistoty. Jelikož tento parametr nevychází z průměru hodnot, je citlivější na změny ve struktuře povrchu (Obrázek 3.8) ^{35, 36}.

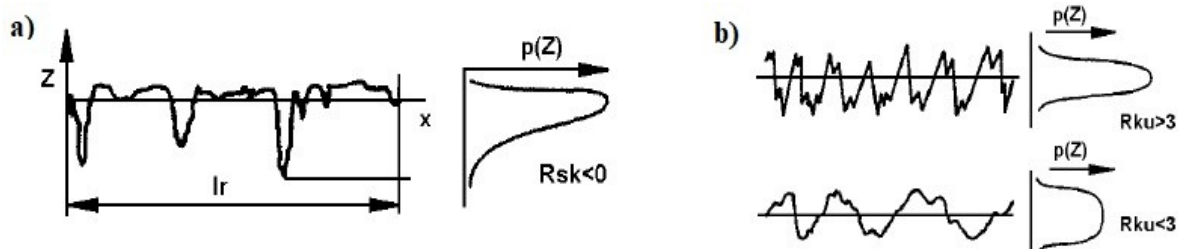


Obrázek 3.8 – Parametr drsnosti R_z ³²

Dalšími parametry pro posuzování drsnosti povrchu jsou:

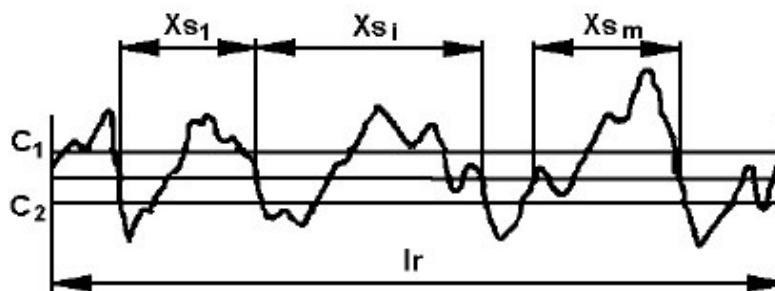
Šikmost posuzovaného profilu R_{sk} – jedná se o podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r . Negativní hodnoty tohoto parametru vypovídají o dobrých vlastnostech nosnosti profilu (Obrázek 3.9) ³⁶.

Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} – je podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny parametru R_q v rozsahu základní délky l_r . (Obrázek 3.9) Pro normální rozdělení souřadnic profilu je $R_{ku} = 3$, pro ostřejší výstupky a rýhy je $R_{ku} > 3$ a naopak ³⁶.



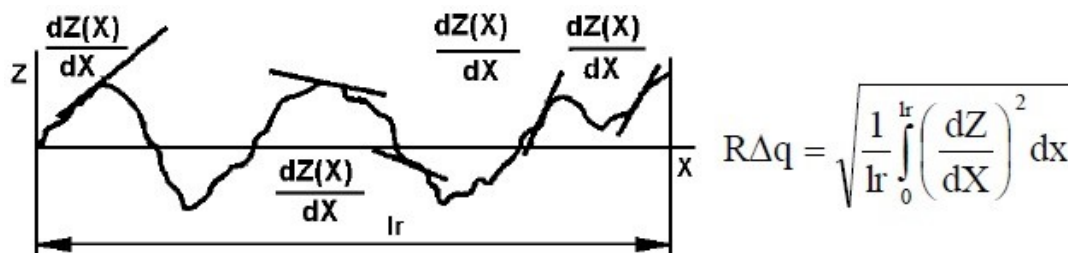
Obrázek 3.9 – Parametry R_{sk} a R_{ku} , a) parametr R_{sk} , b) parametr R_{ku} ³⁶

Průměrná vzdálenost prvků profilu RS_m (délkový parametr) – je průměrná hodnota šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky l_r (Obrázek 3.10). Toto vyhodnocení vyžaduje zadání hladin řezu C_1 a C_2 ³⁶.



Obrázek 3.10 – Délkový parametr RS_m ³⁶

Průměrný kvadratický sklon $R\Delta q$ (tvarový parametr) – průměrná kvadratická hodnota sklonu pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky l_r (Obrázek 3.11). Tento parametr je významný při hodnocení odrazu světla a galvanickém pokovování ³⁶.



Obrázek 3.11 – Tvarový parametr $R\Delta q$ ³⁶

4 Charakteristika plošného hodnocení textury povrchu

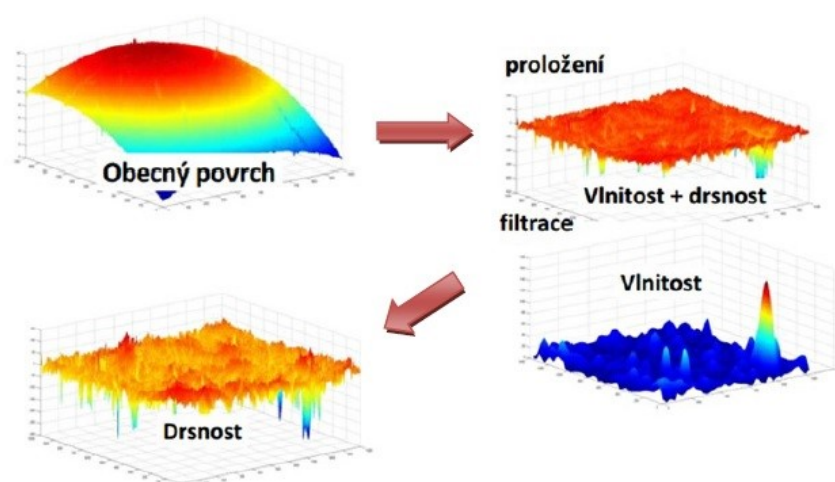
Plošné parametry povrchu jsou definovány podle normy ČSN EN ISO 25178-2. Podle dané normy se tyto parametry rozdělují do dvou základních druhů, a to na parametry prvku a parametry pole. Oba druhy patří k nejvýznamnějším změnám v oblasti posuzování a hodnocení povrchu a představují významný trend v metrologii povrchu. Daná norma obsahuje definice parametrů pro prostorové hodnocení textury a jejich stručnou charakteristiku ^{15, 37}.

Plošné parametry, na rozdíl od parametrů profilových, umožňují kvantitativní hodnocení plochy všemi technicky významnými směry, na základě kterých jsou posuzovány skutečné vlastnosti povrchu, protože v daném případě je povrch posuzován v trojrozměrném prostoru. Toto hodnocení umožňuje stanovit obecnou texturu a celkový tvar plochy, což umožňuje lépe předurčit funkční vlastnosti povrchu při provozu ³⁷.

4.1. Filtrace povrchu

Obrobený povrch lze definovat jako soubor nerovností, které tvoří strukturu povrchu. A právě pro získání znalostí o tomto vytvořeném povrchu je důležitá filtrace, jejíž hlavní vlastností je oddělit krátkovlnné a dlouhovlnné složky profilu povrchu, což umožňuje separovat jednotlivé složky struktury povrchu.

Při analýze textury povrchu je podstatný správný výběr nastavení filtrů. Postup filtrace pro získání jednotlivých složek struktury povrchu je uveden (obrázek 4.1)



Obrázek 4.1 – Filtrace povrchu ³⁸

Filtry používané pro získání plošných parametrů: ¹⁵

- **S-filtr** – slouží pro odstranění malé laterální stupnice z povrchu, což je předpoklad pro dosažení primárního povrchu.
- **L-filtr** – slouží pro odstranění velké laterální stupnice z primárního povrchu nebo S-F povrchu.
- **F-operace** – vylučuje vliv tvaru primárního povrchu.

Postup při snímání a analýze povrchu spočítá v tom, že se nejprve aplikuje **S-filtr**, který z povrchu odstraní prvky s velmi krátkou prostorovou vlnovou délkou, čímž je dosaženo vzniku základního povrchu. Dále je na tento povrch aplikována matematická operace, která se označuje **F-operace**. Tato operace na základě metody nejmenších čtverců vyloučí vliv tvaru z primárního povrchu, čímž vznikne takzvaný **S-F povrch**. Na tento vzniklý povrch může být dále aplikován **L-filtr**, který z povrchu odstraní prvky s dlouhou prostorovou vlnovou délkou a vznikne tak **S-L povrch**. Tyto S-L a S-F povrchy jsou nazývány jako povrchy omezené stupnicí (*Scale-Limited Surface*) ³⁹.

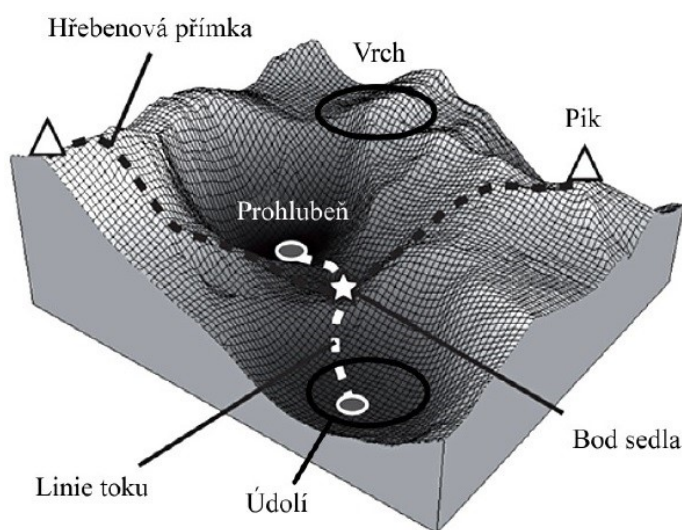
Správná volba filtrů je nezbytným předpokladem pro získání skutečných hodnot plošných parametrů, a proto je obecný postup filtrování povrchu definován normou ČSN EN ISO 25178-3. Tato norma obsahuje tabulky, které slouží ke správnému určení S-filtrů, L-filtrů a F-operací, a to podle toho, která metoda snímání povrchu byla použita ^{37, 40}.

Například pro povrchy, které jsou měřeny optickou metodou, se využije tabulka v dané normě, z které se vybere hodnota maximální laterální periody meze, na základě které se následně stanoví maximální vzorkovací vzdálenost, pomocí které je zjištěna hodnota indexu vnoření S-filtru. Pokud je známa tato hodnota, pak se z další tabulky stanoví hodnoty F-operace nebo L-filtru ⁴⁰.

4.2. Definice základních topografických prvků a parametrů

V normě ČSN EN ISO 25178-2 je obsažena řada pojmů, označující geometrické prvky, které je zapotřebí definovat pro správnou volbu sledovaných parametrů: ^{15, 16}.

- **Pik** (*Peak*) – bod na povrchu, který je vyšší než všechny ostatní body v jeho okolí.
- **Vrch** (*Hill*) – oblast okolo piku, kde směr všech cest s nejvyšším stoupáním končí v piku.
- **Prohlubeň** (*Pit*) – nejnižší bod na povrchu, který je nižší než všechny body v jeho okolí.
- **Údolí** (*Dale*) – oblast okolo prohlubně, kde směr všech maximálních cest končí v prohlubni.
- **Hřebenová přímka** (*Ridge Line*) – křivka, která odděluje přilehlá údolí.
- **Sedlo** (*Saddle*) – sada bodů na omezené stupnici povrchu, kde se kříží hřebenové přímky s přímkami kurzu.
- **Bod sedla** (*Saddle Point*) – jeden bod příslušného sedla.
- **Topografický prvek** (*Topographic Feature*) – plocha, přímka nebo bod prvku, které vymezují stupnici povrchu.
- **Obrysová přímka** (*Contour Line*) – přímka na povrchu skládající se z bodů stejné výšky.
- **Segmentace** (*Segmentation*) – metoda, která slouží pro oddělování omezené stupnice povrchu od odlišných oblastí.
- **Výška piku** (*Peak Height*)
- **Hloubka prohlubně** (*Pit Height*)



Obrázek 4.2 – Vybrané geometrické prvky ³⁷

Norma také obsahuje definice geometrických parametrů, mezi které patří: ¹⁵

- **Parametr pole** – stanovený ze všech bodů v omezené stupnici povrchu.
- **V-parametr** – objem materiálu nebo zrušený objem pole nebo parametr prvku.
- **S-parametr** – pole nebo parametr prvku, který není V-parametr.
- **Výška** – vyznačená kolmá vzdálenost z referenčního povrchu k omezení stupnice povrchu. Výška je záporná, pokud bod leží od referenčního povrchu ve směru materiálu.

4.3. Parametry pole

Pro rozdělení parametrů pole existuje několik způsobů, mezi kterými se nejčastěji objevuje rozdělení do pěti a dvou skupin. Dle normy ČSN EN ISO 25178-2 a dalších publikací jsou parametry pole rozdělovány do pěti skupin na výškové, prostorové, hybridní, funkční a smíšené. Další nejčastější rozdělení parametrů pole je provedeno na základě analýzy ploch S a objemu V . Avšak některé objemové V-parametry se označují jako S-parametry, v tomto případě jde o parametry plošné charakteristiky, které jsou ale vyhodnocovány na základě objemu materiálu ^{15, 41, 42}.

4.3.1. S-parametry

Použití plošných výškových parametrů je podobného charakteru jako u profilových výškových parametrů, a proto je možné pro analýzu povrchu využít profilové i plošné parametry, které se následně porovnají.

Mezi výškové S-parametry patří: ¹⁵

S_a – aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (*Aritmetical Mean Height of the Scale-limited Surface*): Aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy A .

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad [\mu m] \quad (4.3.1)$$

Sq – základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (*Root Mean Square Height of the Scale-limited Surface*): Základ průměrné kvadratické výšky povrchu omezeného stupnicí na stanovené ploše A .

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad [\mu m] \quad (4.3.2)$$

Sp – maximální výška piku omezené stupnice povrchu (*Maximum Peak Height of the Scale Limited Surface*): Největší výška piku uvnitř určené plochy.

Sv – maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu (*Maximum Pit Height of the Scale Limited Surface*): Největší hloubka prohlubně uvnitř stanovené plochy.

Sz – maximální výška omezené stupnice (*Maximum Height of the Scale Limited Surface*): Součet maximální hodnoty výšky piku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř stanovené plochy.

Ssk – šikmost omezené stupnice povrchu (*Skewness of the Scale-Limited Surface*): Kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle Sq uvnitř stanovené plochy. Tento parametr vyjadřuje míru symetrie výšky od střední roviny. Nabývá kladných hodnot v případě, že na povrchu převažují vrcholy nad hloubkami, zatímco záporné hodnoty označuje převahu prohlubní ⁴³.

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (4.3.3)$$

Sku – špičatost omezené stupnice povrchu (*Kurtosis of the Scale-Limited Surface*): Kvocient průměrné čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny Sq uvnitř stanovené plochy A .

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (4.3.4)$$

4.3..2. V-parametry

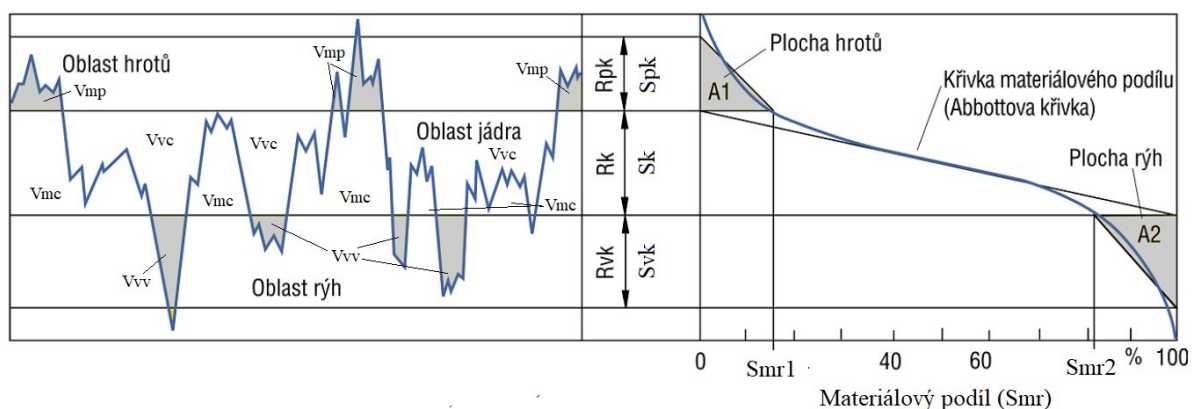
Objemové parametry umožňují hodnotit funkční topografické prvky plochy pomocí analýzy objemu povrchu omezenému stupnicí. Analýza je prováděna na základě objemu materiálu i prázdného prostoru ³⁷.

Tabulka 4.1 – Přehled objemových V-parametrů ^{15, 39}

Funkční parametry	
<i>Sk</i>	Výška jádra (<i>Core Height</i>)
<i>Spk</i>	Redukovaná výška (<i>Reduced Peak Height</i>) Průměrná výška vrcholů nad jádrem drsnosti
<i>Svk</i>	Redukovaná hloubka údolí (<i>Reduced Dale Height</i>) Průměrná hloubka prohlubní pod jádrem drsnosti
<i>Smr</i>	Poměr materiálu (<i>Material Ratio</i>) <i>Smr1</i> – plošný materiálový podíl vymezený průsečíkem křivky na rozhraní vrchů a jádra <i>Smr2</i> – plošný materiálový podíl vymezený průsečíkem křivky na rozhraní jádra a údolí
<i>Spq</i>	Základ průměrné úchytky čtverců plošiny (<i>Plateau Root Mean Square Deviation</i>) Průměrná kvadratická úchytky sklonu střední části křivky plošného materiálového podílu
<i>Svq</i>	Základ průměrné úchytky čtverců údolí (<i>Dale Root Mean Square Deviation</i>) Průměrná kvadratická úchytky křivky plošného materiálového podílu v části údolí
<i>Smq</i>	Poměr materiálu (<i>Material Ration</i>) Plošný materiálový podíl materiálu vymezeným průsečíkem střední čáry a aproximační přímky trendu údolí
Parametry neplatného objemu	
<i>Vvv</i>	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu (<i>Dale Void Volume of the Scale-Limited Surface</i>) Prázdný objem prohlubní pod jádrem drsnosti
<i>Vvc</i>	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu (<i>Core Void Volume of the Scale-Limited Surface</i>) Materiálem nevyplněný objem jádra na povrchu s omezenou stupnicí
Parametry objemu materiálu	
<i>Vmp</i>	Objem materiálu výstupku na jednotku plochy povrchu (<i>Peak Material Volume of the Scale-Limited Surface</i>)
<i>Vmc</i>	Objem jádra materiálu na povrchu s omezenou stupnicí (<i>Core Material Volume of the Scale-Limited Surface</i>)
<i>Sxp</i>	Extrémní výška piku (<i>Peak Extreme Height</i>)

Funkční parametry jsou odvozeny z charakteristiky Abbottovy křivky (obrázek 4.3) materiálového poměru profilu povrchu. První sadu parametrů tvoří řada označená Sk , Spk , Svk a Smr . Tyto parametry jsou definovány stejným výpočetním principem jako soubor 2D parametrů Rk a představují plochu materiálu na dané výškové úrovni. Druhá skupina zahrnuje parametry Vvc , Vvv , Vmp a Vmc , které jsou charakterizovány objemovými vztahy odvozenými z dané křivky a vztahují se k nevyplněnému objemu jádra, nevyplněnému objemu prohlubní, objemu materiálu výstupků a objemu materiálu jádra^{44, 45}.

V případě praktického hlediska je nutné zaměřit se zvláště na parametr Svk (průměrná výška vrcholů nad jádrem drsnosti) a parametr Vvv (objem prázdného místa pod jádrem drsnosti), které se přímo týkají jednotlivých vrubů, pórů a vytrhaných částic na povrchu. Pomocí zmíněných parametrů plošné drsnosti je možné objektivněji a ve větším rozsahu hodnotit topografii daného povrchu²⁶.



Obrázek 4.3 – Křivka nosného podílu pro parametry objemu a jejich souvislost s povrchem⁴⁸

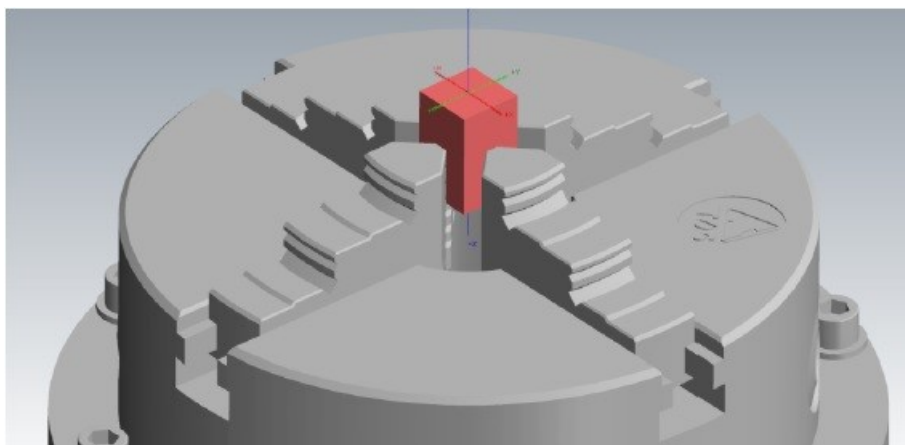
5 Návrh a příprava experimentální části

Cílem experimentální části této diplomové práce je zjištění vlivu změny polohy osy nástroje a skutečné řezné rychlosti, která je závislá na změnách úhlů nástroje ve víceosém frézování, na kvalitu a drsnost obrobené plochy.

Frézování vzorků bylo provedeno na 5osém obráběcím centru DMG MORI DMU 50, jehož popis je součástí příloh. Měření jednotlivých parametrů drsnosti povrchu bylo provedeno na třídimenzionálním mikroskopu Alicona InfiniteFocus.

5.1. Popis polotovaru a řezné parametry pro frézování

Vzorky byly vyrobeny z polotovaru o rozměrech 40x40x20 mm. Materiál polotovaru pro tento experiment je dobře obrobitelná slitina hliníku EN AW-6060 – AlMgSi0,5 F19. Upnutí bylo provedeno pomocí čtyřčelistového sklíčidla na sloupku, který vyniká tuhostí upnutí (*Obrázek 5.1*).



Obrázek 5.1 – Polotovar v čtyřčelistovém sklíčidle na sloupku

Frézování bylo rozděleno do tří cyklů, a to první hrubovací cyklus, druhý hrubovací cyklus a následně dokončovací cyklus. V každém z cyklů byly upraveny některé řezné parametry a vyměněny frézovací nástroje. Pro tuto diplomovou práci je nejdůležitější finální povrch obrobku, tudíž se kapitola zaměřuje pouze na řezné podmínky a nástroje v posledním (dokončovacím) cyklu.

K frézování v dokončovacím cyklu byla použita monolitní karbidová stopková fréza CoroMill Plura s kulovým čelem od společnosti Sandvik Coromant.



Obrázek 5.2 – Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill Plura s kulovým čelem ²⁴

Tabulka 5.1 – Parametry frézy CoroMill Plura ²⁴

Parametr	Hodnota	Jednotka
Řezný průměr frézy	6	[mm]
Počet efektivních obvodových řezných hran	2	[-]
Maximální hloubka řezu	6	[mm]
Maximální otáčky	80 000	[min ⁻¹]
Poloměr břitu	3	[mm]

Tento nástroj byl upnut pomocí hydraulického adaptéru HSK se sklíčidlem CoroChuck 930 také od společnosti Sandvik Comonant.



Obrázek 5.3 – Hydraulický adaptér HSK se sklíčidlem CoroChuck 930 ²

Toto hydraulické upnutí je v nových moderních obráběcích centrech často používané, protože poskytuje mnoho výhod. Mezi tyto výhody patří přesnosti díky pevnému axiálnímu polohování pomocí rovinného dotyku, výborné pohlcování vysokých ohybových momentů, vhodnost pro vysoké otáčky, výborná přesnost při výměně nástroje ²⁵.

Tento upnutý nástroj byl použit za těchto podmínek:

Tabulka 5.2 – Řezné podmínky pro dokončovací cyklus

Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Posuv	f_{min}	2 800	[mm·min ⁻¹]
Posuv na zub	f_z	0,08	[mm]
Přísuv	s_p	1 909	[mm·min ⁻¹]
Otáčky	n	17 500	[min ⁻¹]
Řezná rychlost	v_c	329	[m·min ⁻¹]
Posuv po odjetí	s_o	1 909	[mm·min ⁻¹]
Hloubka řezu	a_p	0,2	[mm]
Šířka řezu	a_e	0,08	[mm]

5.2. Rozdělení frézování vzorků

Pro experiment bylo vyrobeno celkem 25 vzorků, které byly frézovány zmíněnými parametry a nástroji, ale každý vzorek byl frézován při jiném naklonění osy frézovacího nástroje vůči obrobku. Experiment se na základě těchto náklonů skládá ze dvou částí.

V první části byl obroben jeden vzorek, který byl frézován bez změny osy nástroje k obrobku. Jedná se tedy o klasické 3osé frézování s nulovým úhlem náklonu ve směru posuvu β_f a nulovým úhlem náklonu kolmo na směr posuvu β_n .

V druhé části bylo vyrobeno 24 vzorků, kde bylo oproti první části použito frézování se změnou polohy osy nástroje, a to tzv. 5osé frézování, při kterém se do pohybu dostává všech pět os. Jde o frézování, kde sklon osy nástroje oproti normále k povrchu je měněn v závislosti na tvaru plochy, což vede k předpokladu efektivnějšího využití břitu a zlepšení tak kvality obrobeného povrchu. Jednalo se o frézování taženým nástrojem (*kapitola 2*), a jednotlivé náklony jsou vyznačeny v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3 – Jednotlivá naklonění nástroje v experimentu

Rozdělení experimentu					
3osé	5osé				
$\beta_f [^\circ]$ $\beta_n [^\circ]$	$\beta_f [^\circ]$ $\beta_n [^\circ]$				
0° 0°	0° 5°	5° 0°	10° 0°	15° 0°	20° 0°
	0° 10°	5° 5°	10° 5°	15° 5°	20° 5°
	0° 15°	5° 10°	10° 10°	15° 10°	20° 10°
	0° 20°	5° 15°	10° 15°	15° 15°	20° 15°
		5° 20°	10° 20°	15° 20°	20° 20°

5.3. Popis měřicího přístroje Alicona IF

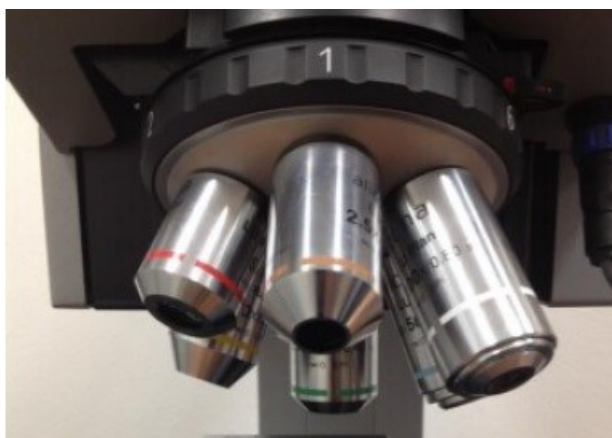
Hodnoty pro posuzování kvality povrchu byly získány měřením pomocí optického třídimenzionálního mikroskopu Alicona InfiniteFocus, který využívá optickou metodu měření. Jedná se tedy o bezdotykové měření, a to pro rozsah mikro a nanometrů.

Princip měřicího přístroje Alicona InfiniteFocus spočívá v optickém dvoudimenzionálním a třídimenzionálním skenování plochy obrobku. To znamená, že se nejedná pouze o měření profilové drsnosti, ale i o komplexní měření plošné drsnosti. Fungování mikroskopu je založeno na principu zaostření, které vertikálně skenuje povrch měřené součásti a průběžně vyhodnocuje měřená data. Za pomoci osvětlovacích prstenců lze měřený povrch nasvětlit, čímž se dosahuje vysoké přesnosti. Systém InfiniteFocus je vybaven objektivem, který využívá různé velikosti zvětšení, a to od 2,5krát do 100krát. Pokud je zapotřebí pokrýt větší plochu měření, je systém vybaven schopností šití na poli nebo obrázku, to znamená, že při procesu měření systém měří několik samostatných 3D datových souborů s nepatrným překrytím, které je v rozmezí 10% až 25%, které se postupně prošívají a vytváření celkovou mapu měření. Po nasvětlení, zaostření a nastavení výchozích parametrů probíhá celé měření automaticky. Veškeré parametry se nastavují pomocí číselných hodnot a ovládání měřicího přístroje je řešeno přes software v počítači a přes ovladač (joystick), kterým je řízen posuv stolu a kolébky s upevněným měřeným předmětem^{26, 27, 28}.

Přístroj Alicona InfiniteFocus pracuje s počítačem (kompatibilní se systémem Windows) přes software IF-Laboratory Measurement, který je dodávám přímo výrobcem. Software je uživatelsky velmi dobře zpracován a nabízí velkou řadu měřících parametrů drsnosti, které vyhodnocuje v přehledných grafem a tabulkách.



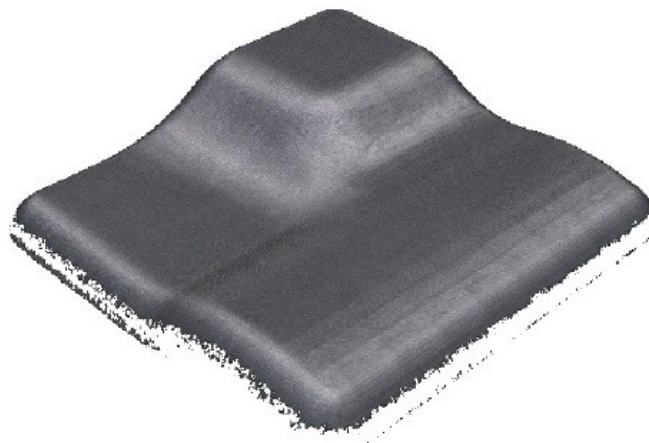
Obrázek 5.4 – Měřicí přístroj Alicona InfiniteFocus



Obrázek 5.5 – Hlava měřícího přístroje s objektivy

5.4. Oblasti měření a vyhodnocované parametry

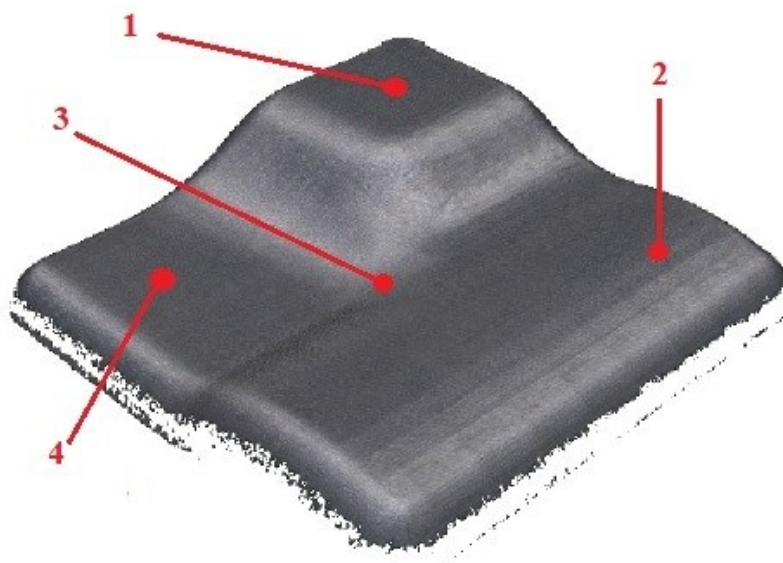
Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, jedná se o vertikální skenování povrchu součásti, proto bylo nejprve provedeno skenování všech vyrobených vzorků. Z každého skenování byl v přístroji vytvořen model (*Obrázek 5.6 – Naskenovaný povrch vzorku*).



Obrázek 5.6 Naskenovaný povrch vzorku

Jednotlivé skenované modely byly následně měřeny pomocí softwaru IF-Laboratory Measutement, a to tak, že byla nejprve měřena 2D drsnost a poté 3D drsnost.

Pro komplexní a více vypovídající měření vzorků lze plocha daného obrobku rozdělit na čtyři části (*Obrázek 5.7 – Oblasti měření*). Části se rozdělují na dvě rovinné plochy, a to v nejvyšším bodě na povrchu vzorku (1), následně v nejnižším bodě na povrchu vzorku (4). Dalšími dvěma částmi je zaoblená plocha, která se nachází po celé délce obrobku (2), a tvarově nejsložitější plocha, kde se kříží několik ploch, definována sedlová plocha (3).



Obrázek 5.7 – Oblasti měření

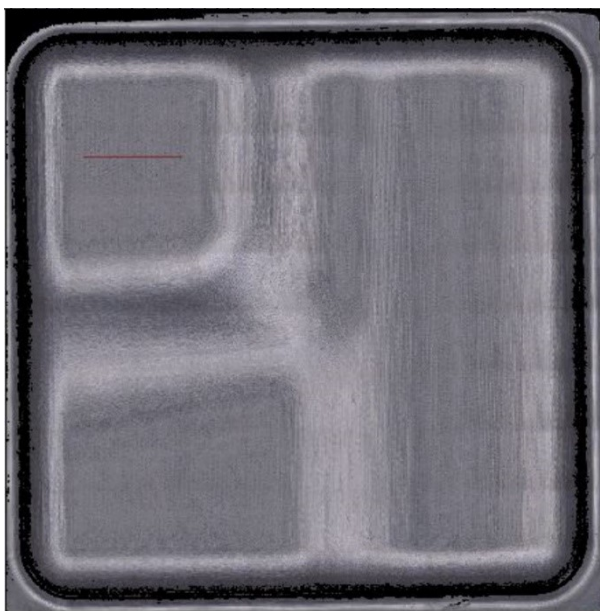
V případě této diplomové práce bylo provedeno měření na třech plochách, a to na zaoblené ploše (2), ploše charakterizované jako sedlová plocha (3) a jedné rovinné ploše (1).

U měření 2D a 3D parametrů drsnosti dochází k odlišným způsobům měření. Zatímco u měření 2D parametrů se k měření využívá pouze profilová délka, u měření 3D parametrů se využívá měření ve všech směrech.

Při měření 2D parametrů drsnosti software zpracovával data pro všechny plochy při zadání stejných parametrů měření, a to z důvodu, aby byly vybrané parametry porovnávány za shodných podmínek a nedocházelo tak ke zkreslení výsledků (*Tabulka 5.4 – Parametry pro měření 2D drsnosti*).

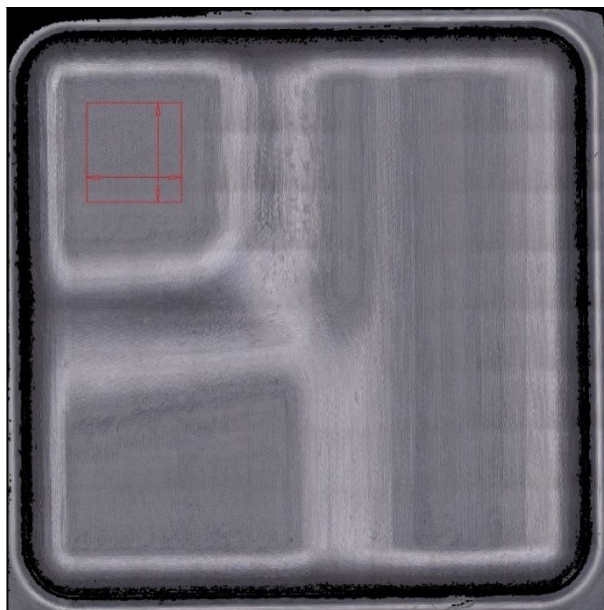
Tabulka 5.4 – Parametry pro měření 2D drsnosti

Měřené oblasti ploch	Profilová délka	Profilová šířka	Vlnová délka cut off wavelength
	l [mm]	[μm]	λ_c [μm]
Plocha (1)	4	70	800
Plocha (2)	4	70	800
Plocha (3)	4	70	800



Obrázek 5.8 – Ukázka měření profilové drsnosti (plocha 1)

U měření plošných a objemových parametrů drsnosti byly u všech ploch stejné oblasti, ze kterých software vyhodnocoval data. Tyto oblasti jsou čtvercové o rozměrech 4x4 milimetrů (*Obrázek 5.9 Ukázka měření plošných a objemových parametrů drsnosti*). Filtr λ_c pro plošnou drsnost se shoduje s měřením profilových parametrů.



Obrázek 5.9 – Ukázka měření plošných a objemových parametrů drsnosti (plocha 1)

Pro získání co nejpodrobnějších vlastností zkoumaného materiálu byly zvoleny parametry (*Tabulka 5.5 – Vyhodnocované 2D a 3D parametry*). Především měření plošných a objemových parametrů umožňuje lepší poznání, a proto se těmito parametry tato práce zabývá ve větším množství.

Tabulka 5.5 – Vyhodnocované 2D a 3D parametry

Označení parametru	Definice parametru	Jednotky
Profilové parametry		
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu	$[\mu\text{m}]$
Rz	Největší výška profilu	$[\mu\text{m}]$
Objemové parametry		
Spk	Průměrná výška vrcholů nad jádrem drsnosti	$[\mu\text{m}]$
Svk	Průměrná hloubka prohlubní pod jádrem drsnosti	$[\mu\text{m}]$
Vmp	Objem materiálu výstupku na jednotku plochy povrchu	$[\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}]$
Vvc	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu	$[\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}]$
Vmc	Objem jádra materiálu na povrchu s omezenou stupnicí	$[\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}]$
Vvv	Prázdný objem prohlubní pod jádrem drsnosti	$[\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}]$

6 Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení

Pro komplexní vyhodnocení výsledných dat experimentálního měření se tato kapitola zabývá nejprve porovnáním jednotlivých měřených parametrů drsnosti povrchu na třech plochách v závislosti na změně úhlu naklonění ve směru posuvu β_f a úhlu naklonění ve směru kolmém na posuv β_n . Následně jsou tyto hodnoty porovnány v závislosti na efektivní řezné rychlosti, která je ovlivněna změnou naklonění nástroje, avšak pouze v případě rovinné plochy (plocha 1).

Z důvodu podrobnějšího poznání o vlastnostech povrchu jsou v práci porovnávány objemové parametry, které udávají konkrétní informace o konkrétním množství maziva, které je možno na povrchu zachytit, nebo o materiálu, který je možné dalším opotřebením odstranit z povrchu při zachování funkčnosti plochy. Těmito parametry jsou především parametry V_{mp} , V_{vc} , V_{mc} , a V_{vv} , které se určují na základě křivky nosného podílu a stanovených úrovní materiálového podílu. K těmto parametrům jsou v práci porovnávány i objemové parametry S_{vk} a S_{pk} . Ostatními informativními porovnávanými parametry jsou R_a , R_z , S_a , a S_z , jejichž porovnání spolu se všemi naměřenými hodnotami je součástí příloh této práce.

6.1. Porovnání parametrů v závislosti na změně naklonění nástroje

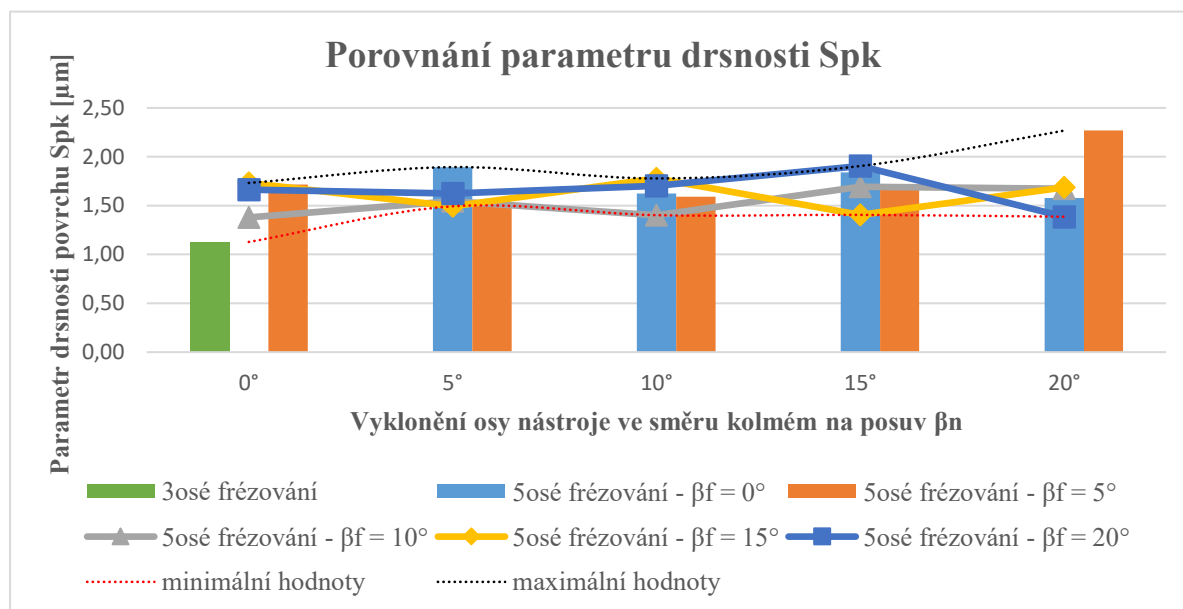
Toto porovnání slouží k zjištění, která možnost naklonění nástroje je z hlediska jednotlivých parametrů pro danou plochu efektivnější. Z důvodu přehlednosti grafů byly jednotlivé možnosti rozděleny do šesti skupin podle naklonění nástroje ve směru posuvu β_f . První samostatnou skupinou je klasické 3osé frézování, to znamená, že oba úhly naklonění jsou 0° . Zbýlých pět skupin je 5osé frézování, kde je v každé skupině vždy stejný úhel naklonění ve směru posuvu β_f , což je znázorněno v popisu řad (legenda) jednotlivých grafů. K těmto úhlům je na ose X znázorněna změna úhlu ve směru kolmém na posuv β_n . Výsledná hodnota naměřeného parametru u jednotlivých úhlů je znázorněna na ose Y. V každém grafu je také vyobrazena oblast hodnot měřeného parametru při různém naklonění nástroje, která je ohraničena minimálními a maximálními naměřenými hodnotami.

V případě porovnání naměřených dat je zapotřebí uvažovat s případnou nejistotou měření, zejména pak u hodnot, které jsou velmi podobné.

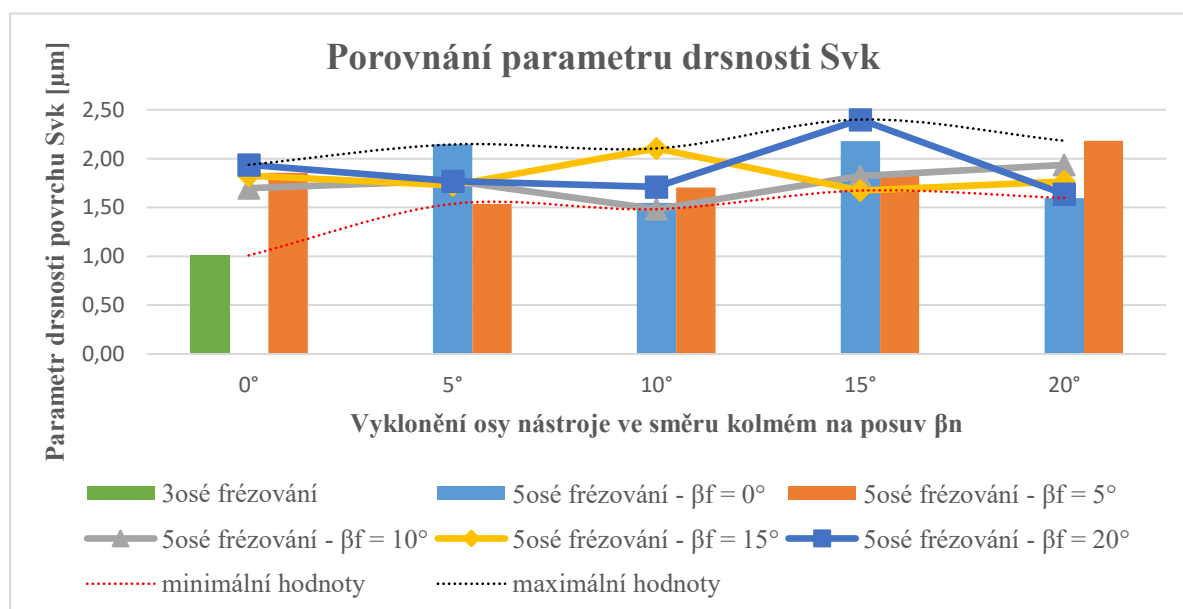
6.1.1. Rovinná plocha (plocha 1)

Rovinná plocha je z měřených ploch tvarově nejjednodušší, bez výrazných zakřivení či zaoblení.

Porovnání průměrných výšek vrcholů nad jádrem drsnosti S_{pk} a průměrných hloubek prohlubní pod jádrem drsnosti S_{vk} (obrázek 6.1 a 6.2)



Obrázek 6.1 - Grafické porovnání parametru drsnosti S_{pk} (plocha 1)



Obrázek 6.2 - Grafické porovnání parametru drsnosti S_{vk} (plocha 1)

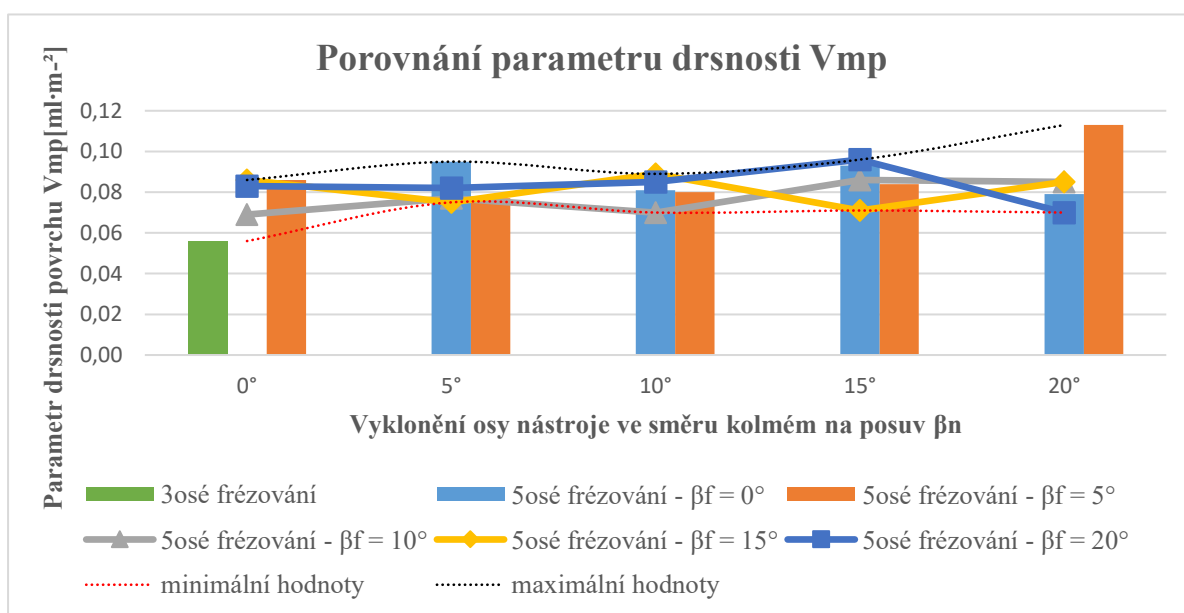
Analýza naměřených hodnot parametrů Spk a Svk :

- Nejnižší hodnoty těchto parametrů jsou v obou případech vykazovány u 3osého frézování.
- U 5osého frézování je nejnižší hodnoty parametru Spk dosahováno náklonem $\beta_f=10^\circ$ a $\beta_n=0^\circ$, zatímco u parametru Svk je nejnižší hodnota při náklonu $\beta_f=10^\circ$ a $\beta_n=10^\circ$.
- Z hlediska obou parametrů lze konstatovat, že k nízkým hodnotám pro 5osé frézování dochází, když je nástroj vůči obrobku nakloněn v obou směrech stejně.
- Vysoké hodnoty u parametru Spk vykazují náklony $\beta_f, \beta_n = 0^\circ, 5^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 5^\circ, 20^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 10^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 15^\circ$, podobně jako u parametru Svk .

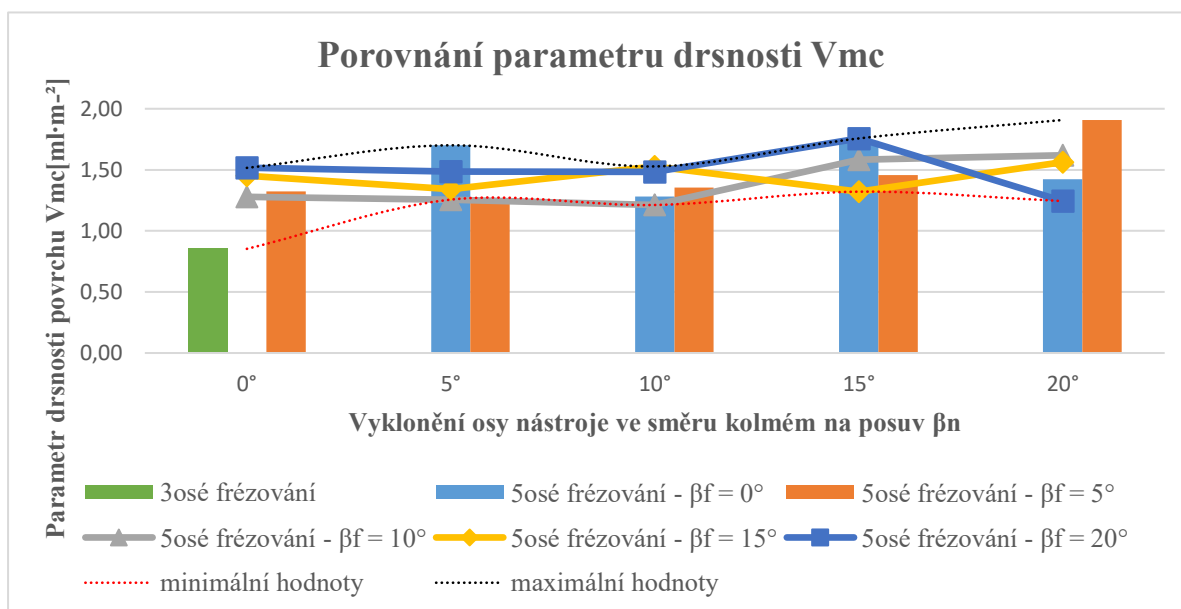
Tabulka 6.1 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů Spk a Svk (plocha 1)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	Spk	Svk	β_f	β_n	Spk	Svk
[°]	[°]	[μm]	[μm]	[°]	[°]	[μm]	[μm]
0	0	1,128	1,01	0	5	1,894	2,145
5	5	1,53	1,537	0	15	1,839	2,18
10	10	1,402	1,483	5	20	2,268	2,183
15	15	1,405	1,673	15	10	1,778	2,105
20	20	1,386	1,637	20	15	1,905	2,40

Porovnání parametrů objemu materiálu výstupků V_{mp} a objemu materiálu jádra V_{mc} (obrázek 6.3 a 6.4)



Obrázek 6.3 - Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{mp} (plocha 1)



Obrázek 6.4 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{mc} (plocha 1)

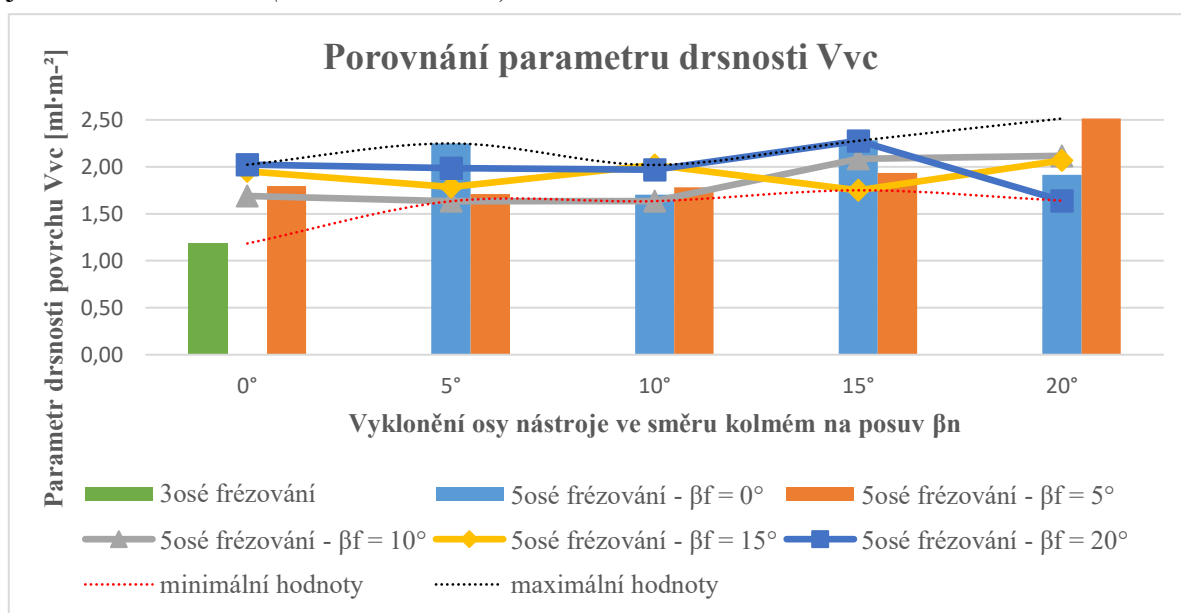
Analýza naměřených hodnot parametrů V_{mp} a V_{mc} :

- Nejnižší hodnoty těchto parametrů jsou v obou případech vykazovány u 3osého frézování.
- U 5osého frézování jsou z hlediska těchto parametrů náklony s nejnižšími i nejvyššími hodnotami velmi podobné jako v předchozím případě.
- Nejnižší hodnoty parametru V_{mp} jsou dosahovány při náklonu $\beta_f=10^\circ$ a $\beta_n=0^\circ$ a nejnižší hodnota parametru V_{mc} při náklonu $\beta_f=10^\circ$ a $\beta_n=10^\circ$.
- Nejvyšší hodnoty jsou dosahovány u náklonů $\beta_f, \beta_n = 0^\circ, 5^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 0^\circ, 15^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 5^\circ, 20^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 15^\circ$ a u parametru V_{mp} také u náklonů $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 0^\circ$ a $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 10^\circ$.

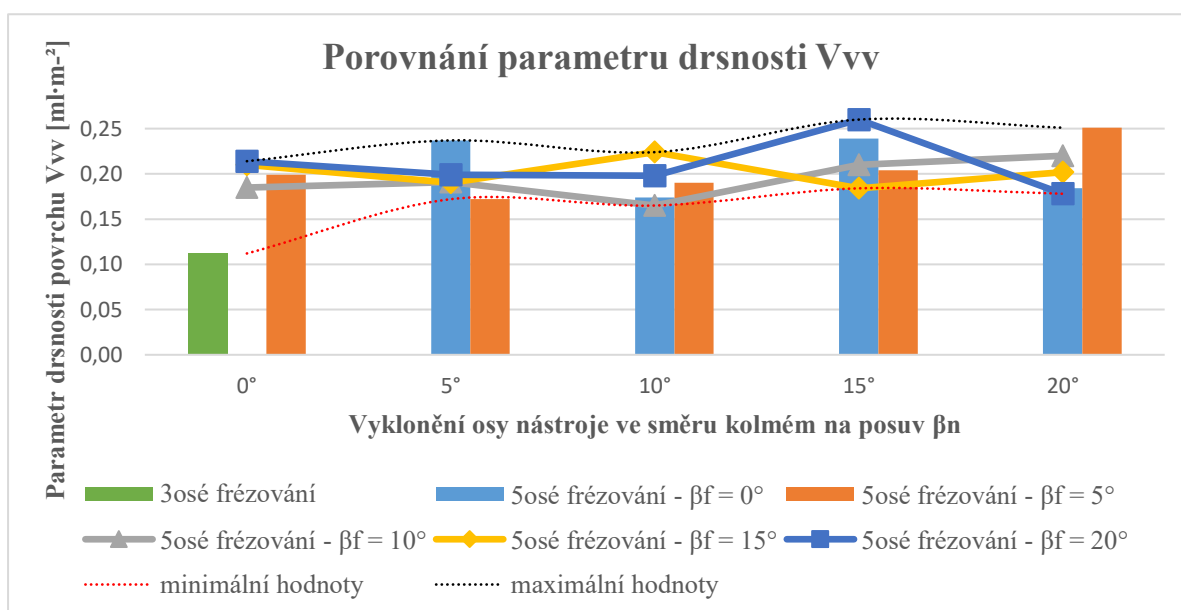
Tabulka 6.2 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů V_{mp} a V_{mc} (plocha 1)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	V_{mp}	V_{mc}	β_f	β_n	V_{mp}	V_{mc}
[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]	[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]
0	0	0,056	0,853	0	5	0,095	1,701
5	5	0,077	1,268	0	15	0,093	1,738
10	0	0,069	1,280	5	20	0,113	1,908
10	10	0,07	1,212	15	0	0,086	1,452
15	15	0,071	1,321	15	10	0,089	1,528
20	20	0,07	1,244	20	15	0,096	1,757

Porovnání parametru neplatného objemu jádra V_{vc} a prázdného objemu prohlubní pod jádrem drsnosti V_{vv} (obrázek 6.5 a 6.6).



Obrázek 6.5 - Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{vc} (plocha 1)



Obrázek 6.6 – Grafické porovnání objemového parametrů drsnosti V_{vv} (plocha 1)

Analýza naměřených hodnot parametrů V_{vc} a V_{vv} :

- Nejnižší hodnoty těchto parametrů jsou v obou případech vykazovány u 3osého frézování.
- I pro oba tyto parametry jsou velmi shodné efektivní a neefektivní náklony.
- Nejnižší hodnota parametru V_{vv} je dosažena při náklonu $\beta_f = 10^\circ$ a $\beta_n = 10^\circ$ a u parametru V_{vc} jsou velmi nízké hodnoty u náklonu $\beta_f, \beta_n = 10^\circ, 5^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 10^\circ, 10^\circ$ a $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 20^\circ$.

- Nejvyšší hodnoty jsou dosahovány při náklonech $\beta_f, \beta_n = 0^\circ, 5^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 0^\circ, 15^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 5^\circ, 20^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 0^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 10^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 15^\circ$.

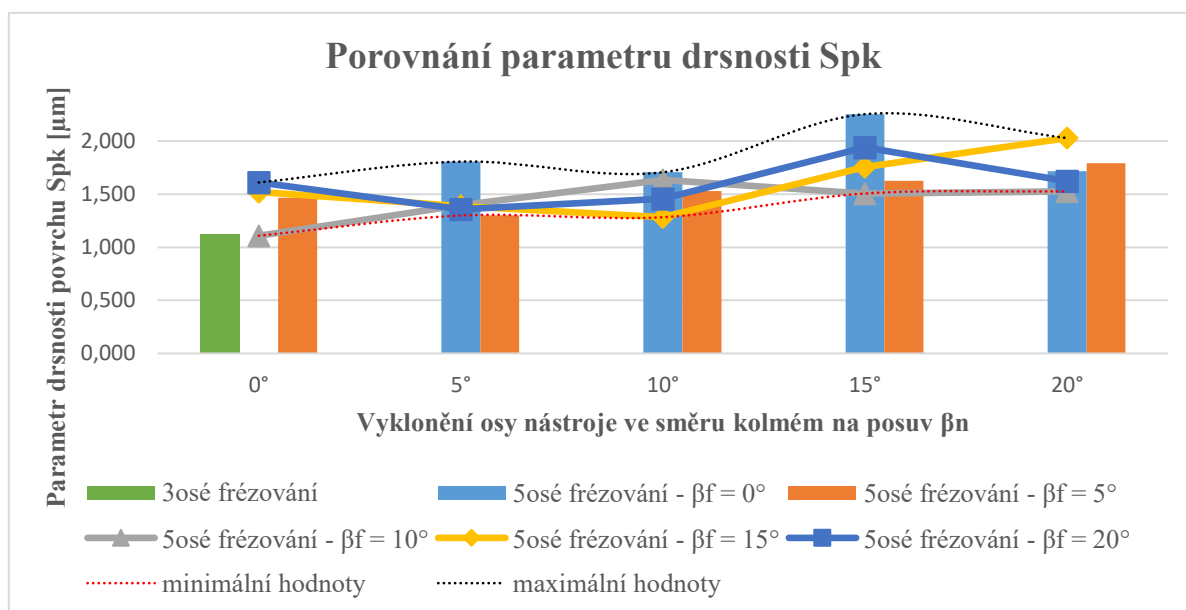
Tabulka 6.3 - Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů V_{vc} a V_{vv} (plocha 1)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	V_{vv}	V_{vc}	β_f	β_n	V_{vv}	V_{vc}
[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]	[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]
0	0	0,112	1,184	0	5	0,237	2,249
0	10	0,174	1,702	0	15	0,239	2,282
5	5	0,172	1,711	5	20	0,251	2,514
10	10	0,165	1,635	15	0	0,21	1,952
15	15	0,184	1,75	15	10	0,224	2,020
20	20	0,178	1,640	20	0	0,214	2,023
				20	15	0,260	2,277

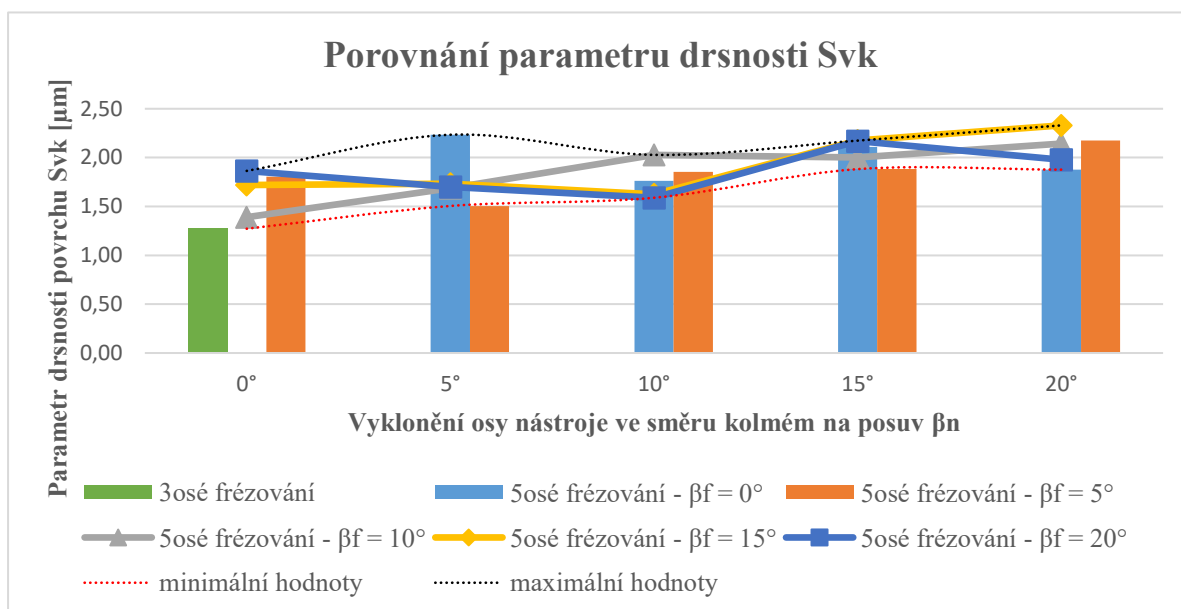
Z celkového hlediska všech porovnávaných parametrů jsou nejnižší hodnoty pro rovinnou plochu vykazovány náklonem $\beta_f = 10^\circ$ a $\beta_n = 10^\circ$, další nízké hodnoty jsou dosahovány, když náklony ve směru posuvu a ve směru kolmém na posuv jsou totožné. Nejvyšší hodnoty jsou dosahovány při náklonu $\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$; $\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$; $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$; $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$; $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$; $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$;

6.1..2. Zaoblená plocha (plocha 2)

Porovnání průměrných výšek vrcholů nad jádrem drsnosti Sp_k a průměrných hloubek prohlubní pod jádrem drsnosti Svk (obrázek 6.7 a 6.8)



Obrázek 6.7 – Grafické porovnání parametru drsnosti Sp_k (plocha 2)



Obrázek 6.8 – Grafické porovnání parametru drsnosti S_{vk} (plocha 2)

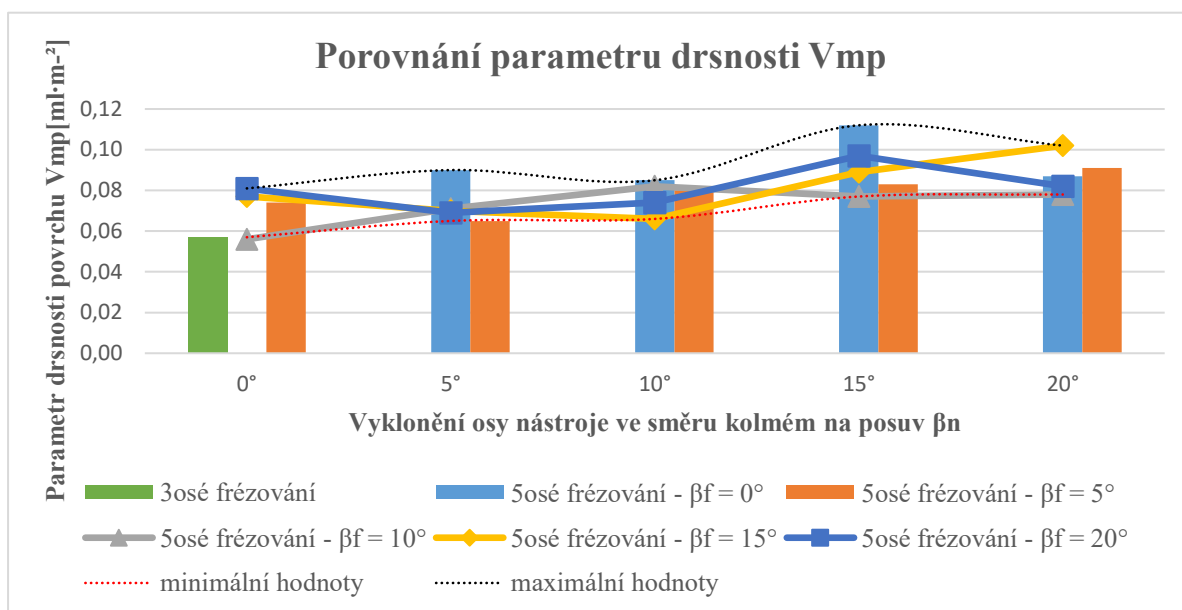
Analýza naměřených hodnot parametrů Spk a S_{vk} :

- 3osé frézování zaoblené plochy vykazuje stále velmi nízké hodnoty, avšak v tomto případě jsou hodnoty při naklonění nástroje o $\beta_f = 10^\circ$ a $\beta_n = 0^\circ$ velmi podobné.
- Další nízké hodnoty jsou dosahovány při náklonech $\beta_f, \beta_n = 5^\circ, 5^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 5^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 10^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 5^\circ$ a $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 10^\circ$.
- Velmi vysoké hodnoty vykazují náklony s úhlem vyklonění nástroje ve směru posuvu $\beta_f = 0^\circ$, kromě 3osého frézování. Dalších vysokých hodnot je dosaženo při náklonech $\beta_f, \beta_n = 5^\circ, 20^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 15^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 15^\circ, 20^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 15^\circ$.
- Podle parametru S_{vk} jsou vysoké hodnoty vykazovány ještě při náklonech $\beta_f, \beta_n = 10^\circ, 10^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 10^\circ, 15^\circ$; $\beta_f, \beta_n = 10^\circ, 20^\circ$ a $\beta_f, \beta_n = 20^\circ, 20^\circ$.
- Z těchto hodnot vyplývá, že nejnižší hodnoty nejsou vykazovány při stejných náklonech v obou směrech, jak tomu bylo u rovinné plochy.

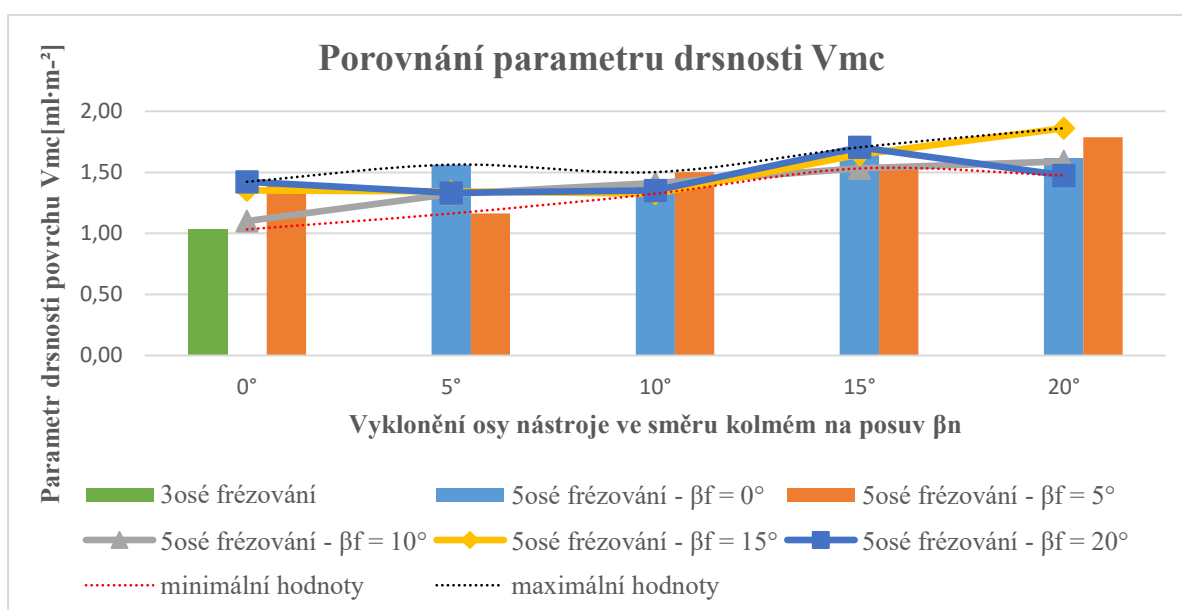
Tabulka 6.4 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů Spk a S_{vk} (plocha 2)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	Spk	S_{vk}	β_f	β_n	Spk	S_{vk}
[°]	[°]	[µm]	[µm]	[°]	[°]	[µm]	[µm]
0	0	1,129	1,272	0	5	1,807	2,234
5	5	1,299	1,505	0	15	2,253	2,110
10	0	1,108	1,390	5	20	1,792	2,174
				15	15	1,755	2,174
				15	20	2,028	2,330
				20	15	1,940	2,169

Porovnání parametrů objemu materiálu výstupků V_{mp} a objemu materiálu jádra V_{mc} (obrázek 6.9 a 6.10)



Obrázek 6.9 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{mp} (plocha 2)



Obrázek 6.10 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{mc} (plocha 2)

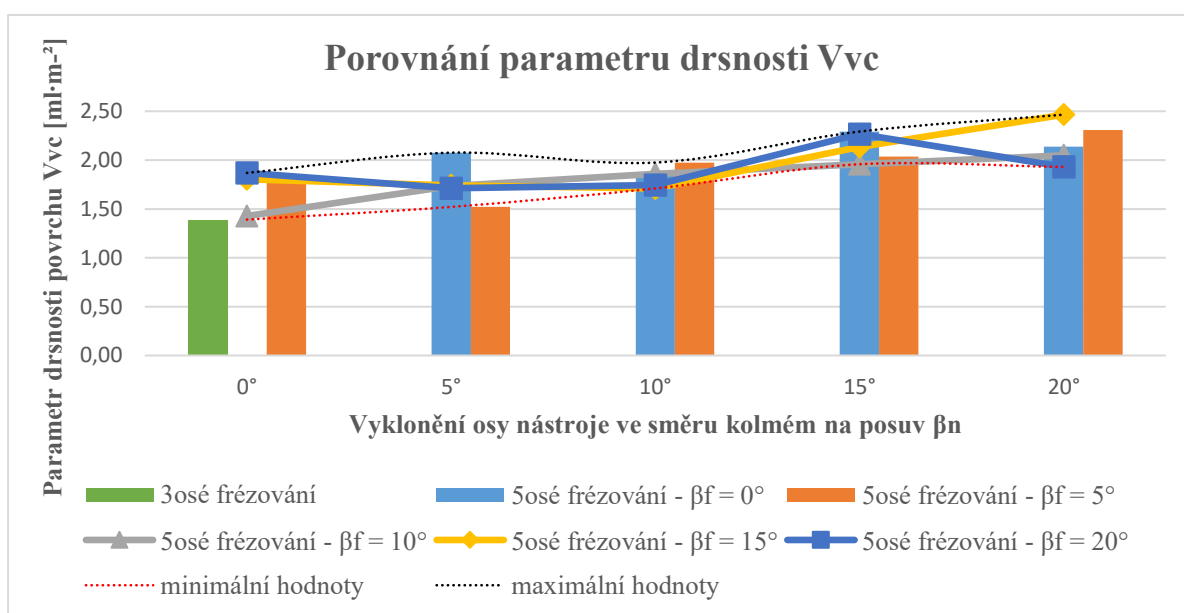
Analýza naměřených hodnot parametrů V_{mp} a V_{mc} :

- Z hlediska těchto parametrů jsou vykazovány nejnižší i nejvyšší hodnoty ve stejných náklonech jako je tomu v případě parametrů Spk a Svk .
- Nejnižší hodnoty jsou dosahovány u 3osého frézování a frézování s náklony $\beta_f = 10^\circ$ a $\beta_n = 0^\circ$.

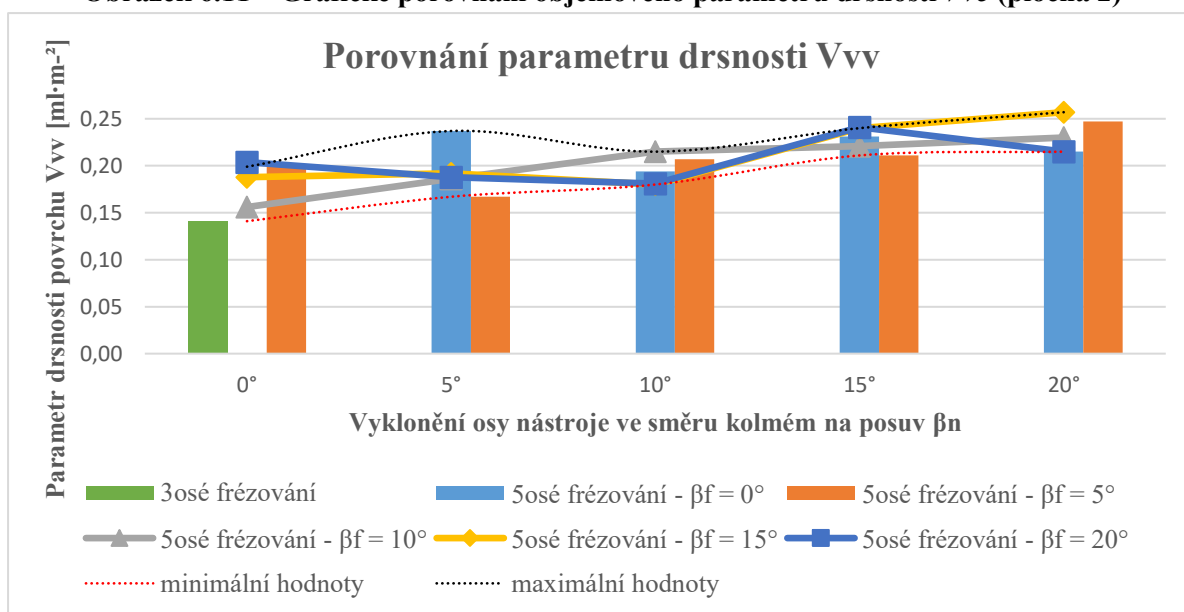
Tabulka 6.5 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů V_{mp} a V_{mc} (plocha 2)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	V_{mp}	V_{mc}	β_f	β_n	V_{mp}	V_{mc}
[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]	[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]
0	0	0,057	1,033	0	15	0,112	1,668
5	5	0,065	1,163	5	20	0,091	1,788
10	0	0,056	1,101	15	20	0,102	1,861
15	10	0,066	1,325	20	15	0,097	1,705

Porovnání parametru neplatného objemu jádra V_{vc} a prázdného objemu prohlubní pod jádrem drsnosti V_{vv} (obrázek 6.11 a 6.12).



Obrázek 6.11 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{vc} (plocha 2)



Obrázek 6.12 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{vv} (plocha 2)

Analýza naměřených hodnot parametrů V_{vc} a V_{vv} :

- Z hlediska prázdných a neplatných objemů lze konstatovat, že nejnižších hodnot je dosaženo při 3osém frézování. Další nízké hodnoty vykazují náklony $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$ a $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$.
- V ostatních zkoumaných možnostech naklonění je v případě těchto parametrů dosahováno vyšších hodnot ve výrazně vyšším počtu. I v tomto případě platí, že je vysokých hodnot dosahováno tam, kde je ve směru posuvu úhel nulový.

Tabulka 6.6 - Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů V_{vc} a V_{vv} (plocha 2)

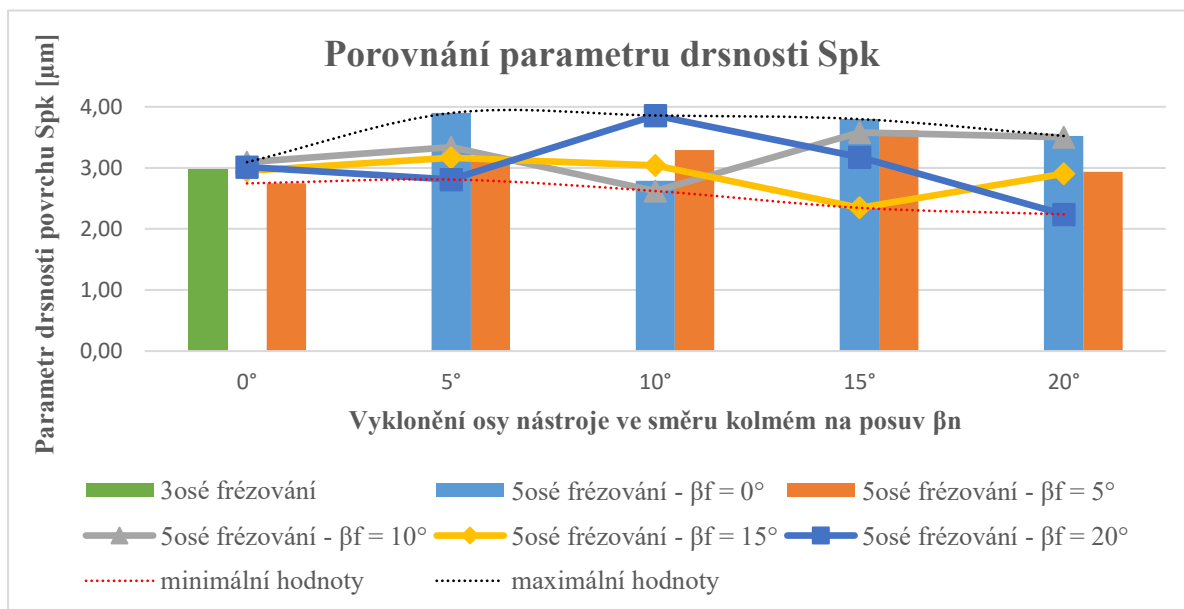
Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	V_{vv}	V_{vc}	β_f	β_n	V_{vv}	V_{vc}
[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]	[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]
0	0	0,141	1,391	0	5	0,237	2,076
5	5	0,167	1,521	0	10	0,194	1,878
10	0	0,156	1,428	0	15	0,231	2,292
				0	20	0,215	2,137
				5	15	0,211	2,037
				5	20	0,247	2,308
				10	10	0,215	1,859
				10	15	0,221	1,958
				10	20	0,230	2,048
				15	15	0,240	2,135
				15	20	0,257	2,465
				20	15	0,241	2,267
				20	20	0,215	1,930

Z celkového hlediska všech porovnávaných parametrů jsou nejnižší hodnoty pro zaoblenou plochu vykazovány 3osým frézováním a náklonem $\beta_f = 10^\circ$ a $\beta_n = 0^\circ$. Pro zaoblenou plochu neplatí, že při naklonění nástroje v obou směrech stejně je dosahováno nízkých hodnot, spíše naopak. Další nižší hodnoty jsou vykazovány při náklonech $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$ a $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$. Nejvyšší hodnoty pro všechny parametry pro zaoblenou plochu vykazuje celá skupina náklonu, kde je úhel ve směru posuvu $\beta_f = 0$. Výjimkou je 3osého frézování. Další náklony vykazující vysoké hodnoty jsou $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$, $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$, $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$, $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$, $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$,

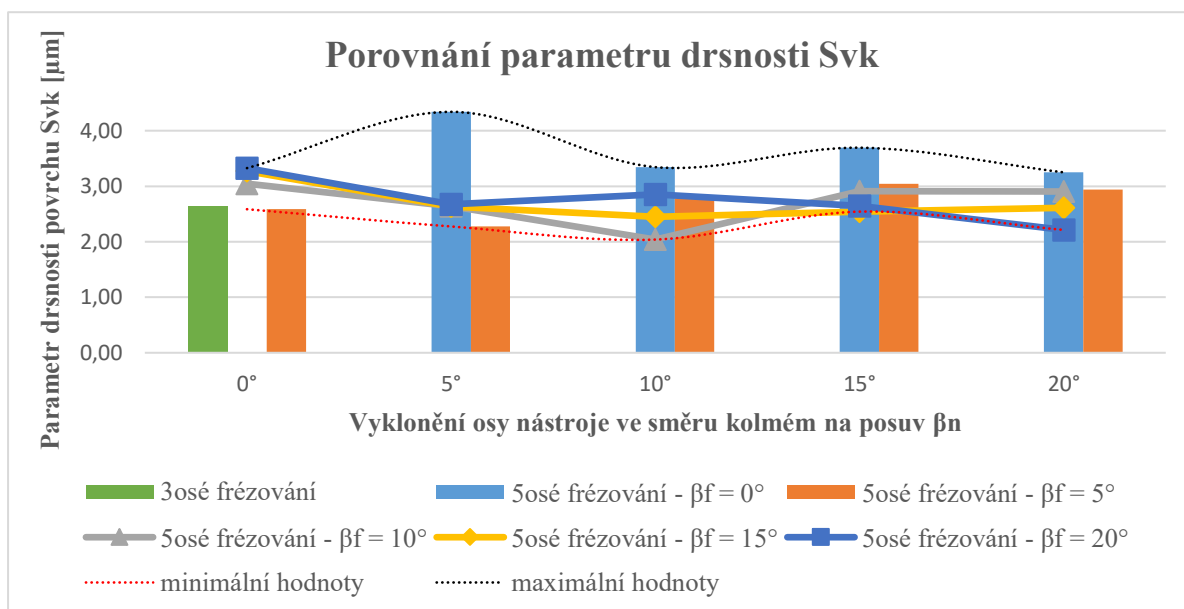
6.1.3. Sedlová plocha (plocha 3)

Tato měřená plocha je tvarově nejsložitější plochou, je definovaná jako sada bodů na omezené stupnici, kde se kříží hřebenové přímky s přímkami kurzu.

Porovnání průměrných výšek vrcholů nad jádrem drsnosti Spk a průměrných hloubek prohlubní pod jádrem drsnosti Svk (obrázek 6.13 a 6.14)



Obrázek 6.13 – Grafické porovnání parametru drsnosti Spk (plocha 3)



Obrázek 6.14 – Grafické porovnání parametru drsnosti Svk (plocha 3)

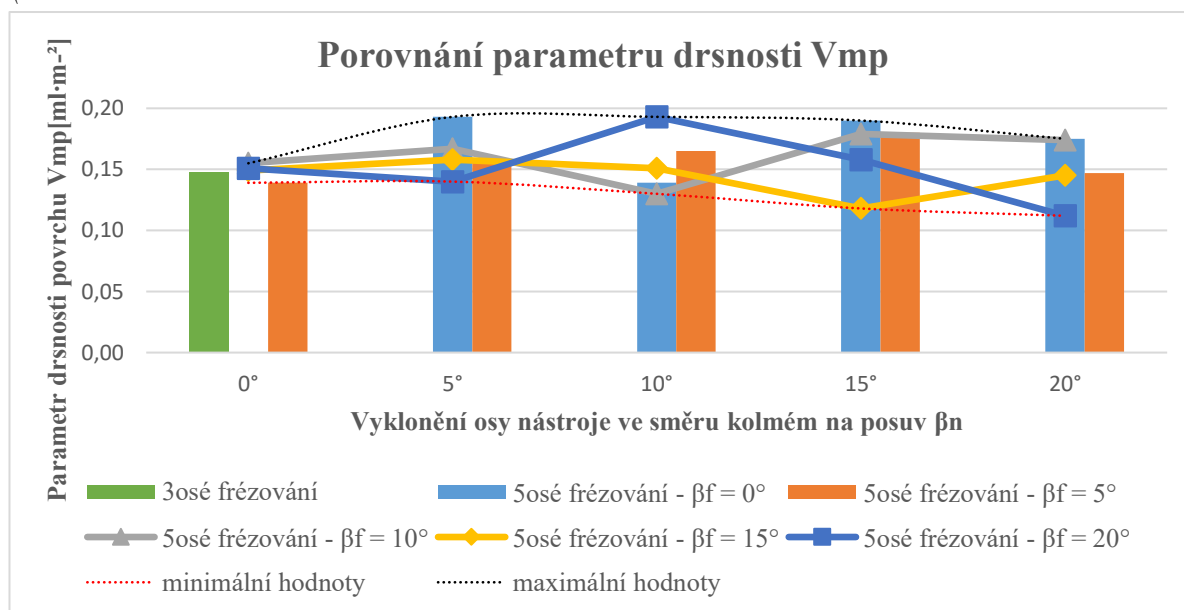
Analýza naměřených hodnot parametrů Spk a Svk :

- 3osé frézování u sedlové plochy už nevykazuje nejnižší hodnoty, ale stále patří k hodnotám nižším oproti jiným (ostatním) náklonům.
- Opět je většina nízkých hodnot u změny polohy osy nástroje, kde je úhel ve směru posuvu a úhel ve směru kolmém na posuv, stejný, jako tomu bylo u rovinné plochy.
- Další nízké hodnoty jsou dosahovány například náklony $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$ a $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$.
- Naopak nejvyšších hodnot je dosahováno, stejně jako u zaoblené plochy (plocha 2), když je úhel ve směru posuvu nulový. Další vysoké hodnoty jsou vykazovány náklony $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$, $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$, $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$ a $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$.

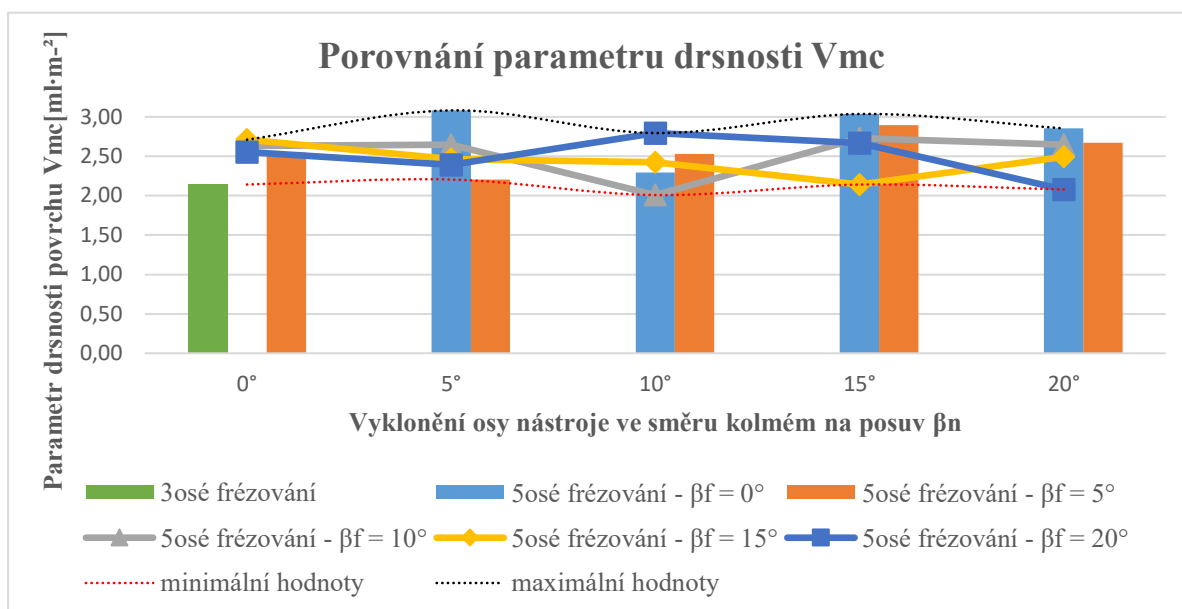
Tabulka 6.7 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů Spk a Svk (plocha 3)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	Spk	Svk	β_f	β_n	Spk	Svk
[°]	[°]	[μm]	[μm]	[°]	[°]	[μm]	[μm]
0	0	2,982	2,639	0	5	3,899	4,340
5	0	2,746	2,586	0	10	2,788	3,344
10	10	2,621	2,039	0	15	3,799	3,694
15	15	2,346	2,542	0	20	3,523	3,250
20	5	2,809	2,676	5	15	3,615	3,046
20	20	2,24	2,213	20	0	3,017	3,326
				20	10	3,858	2,854

Porovnání parametrů objemu materiálu výstupků V_{mp} a objemu materiálu jádra V_{mc} (obrázek 6.15 a 6.16)



Obrázek 6.15 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{mp} (plocha 3)



Obrázek 6.16 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{mc} (plocha 3)

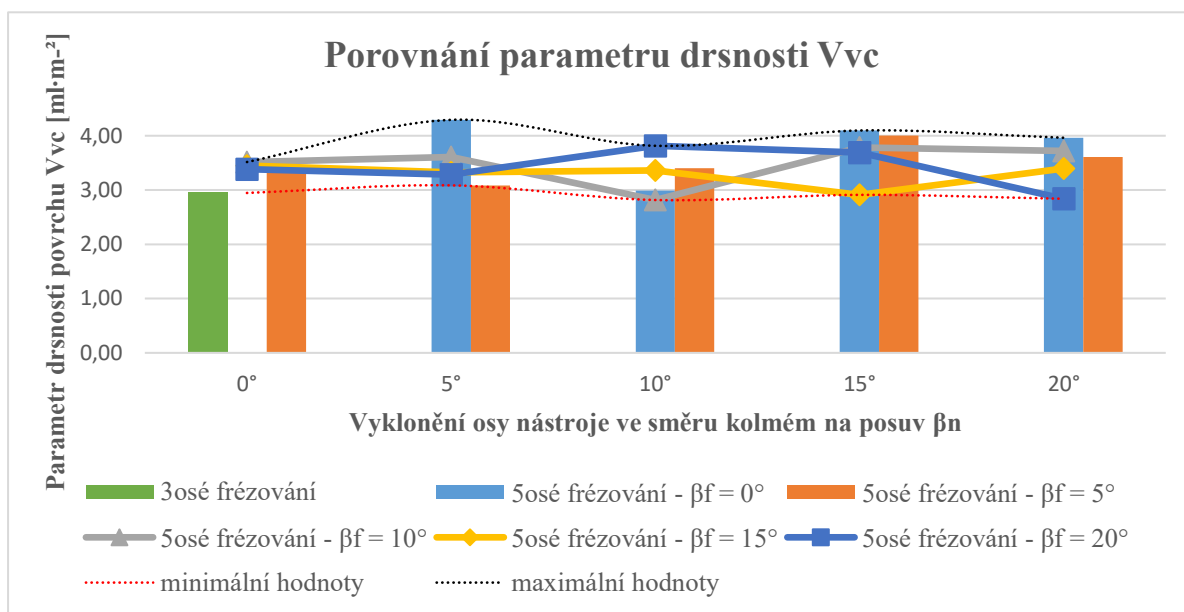
Analýza naměřených hodnot parametrů V_{mp} a V_{mc} :

- Při porovnání parametrů objemu materiálu výstupků a objemu materiálu jádra také platí, že 3osé frézování stále vykazuje nízké hodnoty, ale hodnoty některých náklonů vykazují ještě nižší hodnoty. I další nízké a vysoké hodnoty jsou dosahovány velmi podobnými náklony, jako tomu bylo u parametrů průměrných výšek vrcholků nad jádrem drsnosti Spk a průměrných hloubek prohlubní pod jádrem drsnosti Svk

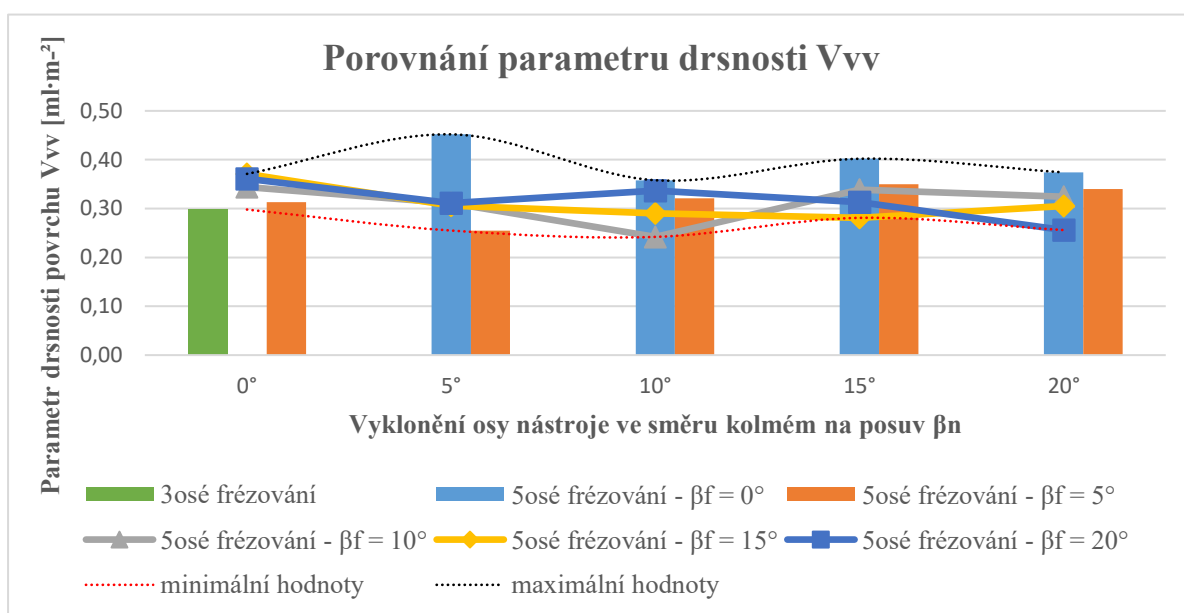
Tabulka 6.8 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů V_{mp} a V_{mc} (plocha 3)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	V_{mp}	V_{mc}	β_f	β_n	V_{mp}	V_{mc}
[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]	[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]
0	0	0,148	2,142	0	5	0,193	3,083
10	10	0,130	2,008	0	15	0,190	3,037
15	15	0,118	2,141	0	20	0,175	2,854
20	5	0,140	2,392	5	15	0,180	2,896
20	20	0,112	2,079	10	15	0,179	2,730
				20	10	0,193	2,795

Porovnání parametru neplatného objemu jádra V_{vc} a prázdného objemu prohlubní pod jádrem drsnosti V_{vv} (obrázek 6.17 a 6.18).



Obrázek 6.17 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{vc} (plocha 3)



Obrázek 6.18 – Grafické porovnání objemového parametru drsnosti V_{vv} (plocha 3)

Analýza naměřených hodnot parametrů V_{vc} a V_{vv} :

- Při porovnávání hodnot parametrů neplatného objemu jádra a prázdného objemu prohlubní pod jádrem drsnosti lze konstatovat, že pro sedlovou plochu vykazují nízké a vysoké hodnoty stejné náklony jako pro předchozí parametry Spk , Svk , Vmp a Vmc .

Tabulka 6.9 – Efektivnost náklonů osy nástroje z hlediska parametrů V_{vc} a V_{vv} (plocha 3)

Nejvíce efektivní				Nejméně efektivní			
β_f	β_n	V_{vv}	V_{vc}	β_f	β_n	V_{vv}	V_{vc}
[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]	[°]	[°]	[ml·m ⁻²]	[ml·m ⁻²]
0	0	0,298	2,946	0	5	0,452	4,293
5	5	0,255	3,086	0	15	0,402	4,097
10	10	0,242	2,816	0	20	0,374	3,963
15	15	0,281	2,911	5	15	0,35	4,002
20	20	0,256	2,839	10	15	0,339	3,784
				15	0	0,371	3,450
				20	10	0,337	3,815

6.1..4. Celkové hodnocení z hlediska všech ploch

Předchozí porovnávání se věnuje závislosti náklonu ve směru posuvu a ve směru kolmém na posuv samostatně pro daný tvar plochy. Avšak je zapotřebí uvažovat o těchto plochách jako o celku, tedy jako o tvarově složité součásti. Proto je zajímavé si uvědomit, které úhly vyklonění nástroje vykazují co nejeefektivnější hodnoty pro všechny porovnávané druhy ploch zároveň. Nejvhodnější a nejméně vhodné náklony nástroje, které vyplývají ze všech měřených experimentálních ploch, jsou uvedeny v následující tabulce (*tabulka 6.10*).

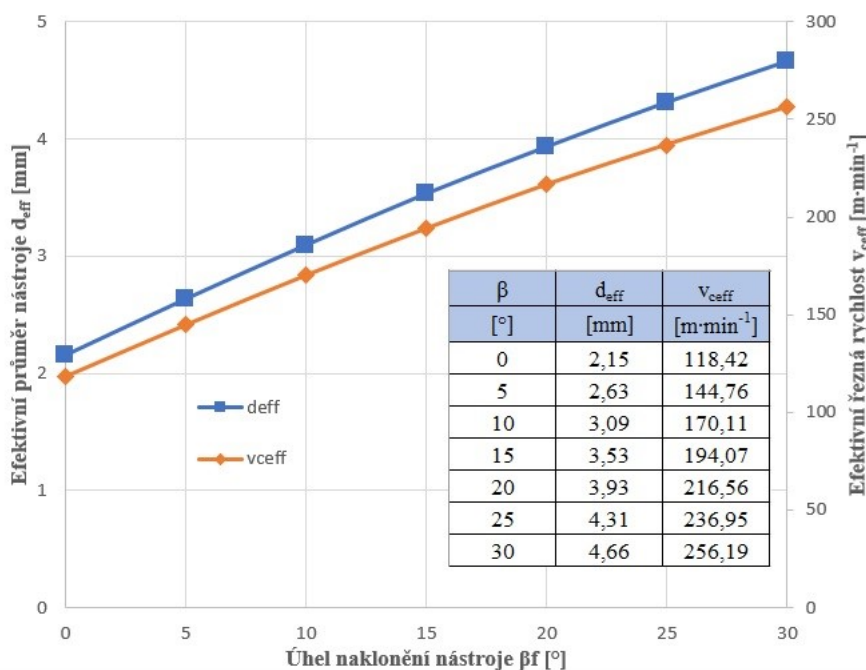
Tabulka 6.10 – Celkové nejvhodnější a nejméně vhodné náklony osy nástroje

Nejvíce efektivní náklony		Nejméně efektivní náklony	
$\beta_f = 0^\circ$	$\beta_n = 0^\circ$	$\beta_f = 0^\circ$	$\beta_n = 20^\circ$
$\beta_f = 10^\circ$	$\beta_n = 10^\circ$	$\beta_f = 20^\circ$	$\beta_n = 15^\circ$
$\beta_f = 5^\circ$	$\beta_n = 5^\circ$	$\beta_f = 5^\circ$	$\beta_n = 20^\circ$
$\beta_f = 20^\circ$	$\beta_n = 20^\circ$	$\beta_f = 0^\circ$	$\beta_n = 15^\circ$
$\beta_f = 10^\circ$	$\beta_n = 0^\circ$	$\beta_f = 0^\circ$	$\beta_n = 5^\circ$
$\beta_f = 15^\circ$	$\beta_n = 15^\circ$		

Všechna naměřená data spolu s doplňujícími profilovými parametry drsnosti jsou uvedena v přílohách této práce. V přílohách práce jsou uvedena i grafická porovnání doplňujících profilových parametrů.

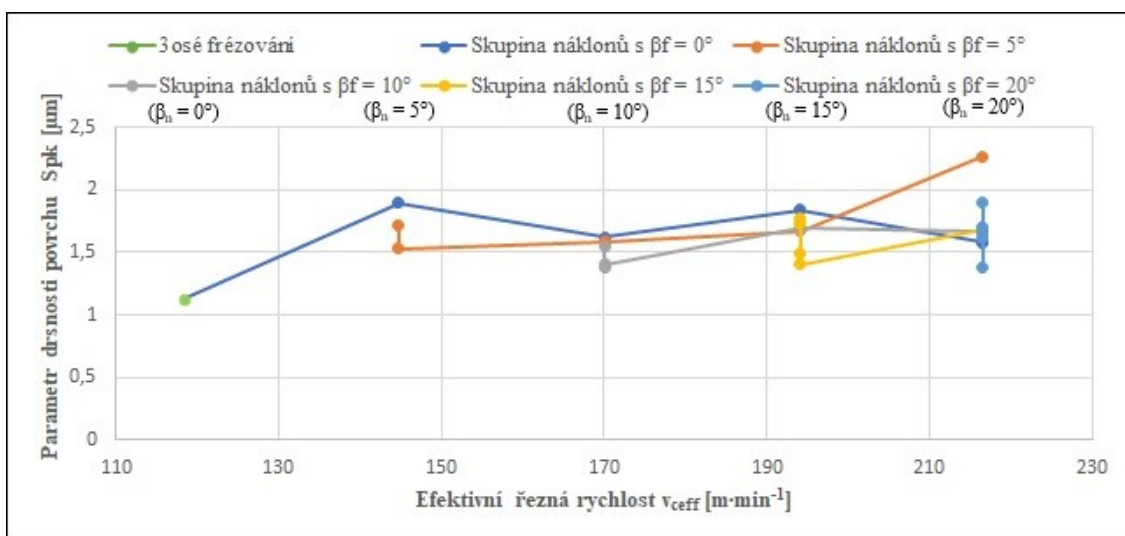
6.2. Závislost měřených parametrů na efektivní řezné rychlosti

Problematikou této práce je vliv změny polohy osy nástroje vzhledem k obráběnému povrchu na jeho kvalitu. Při změně polohy osy nástroje dochází ke změně skutečného (efektivního) průměru frézy d_{eff} , a tím i ke změně skutečné (efektivní) řezné rychlosti v_{ceff} . Konkrétní příklad znázorňuje následující graf (obrázek 6.19), kde je znázorněna závislost efektivního průměru frézy d_{eff} na úhlu změny polohy osy nástroje o úhel β při frézování kulovou frézou.

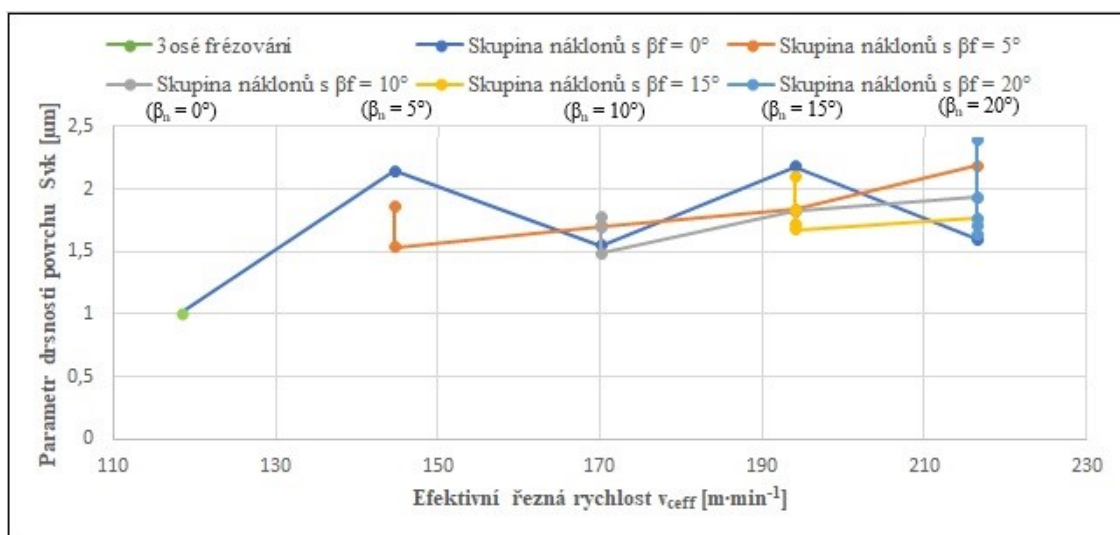


Obrázek 6.19 – Závislost efektivního průměru frézy d_{eff} a efektivní řezné rychlosti v_{ceff} na změně osy nástroje o úhel β ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

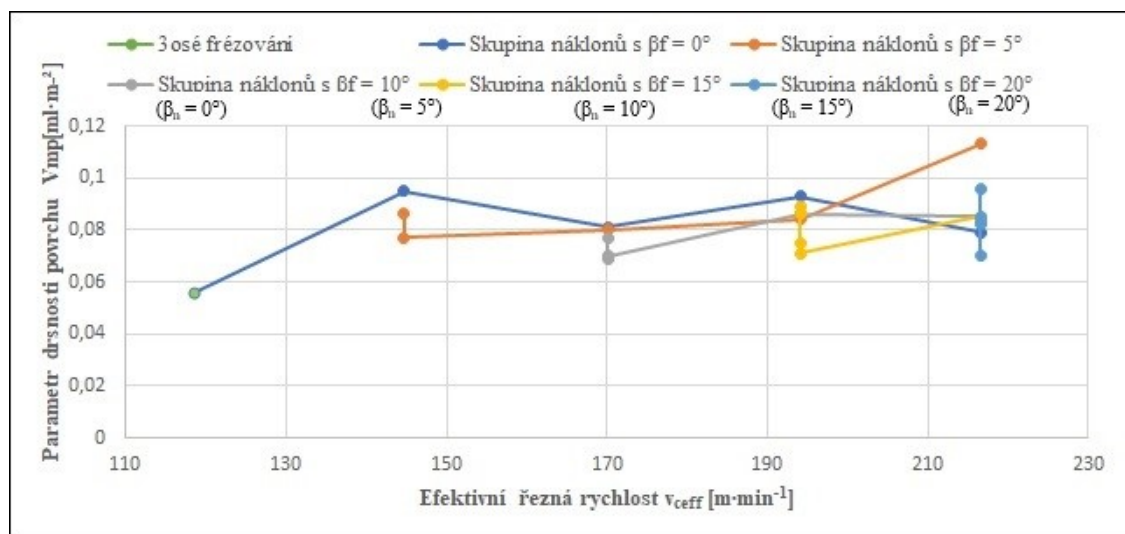
Vypočtené hodnoty efektivních řezných průměrů d_{eff} a efektivních řezných rychlostí v_{ceff} jsou pro jednotlivé změny polohy osy nástroje uvedeny v přílohách práce. Výpočty těchto hodnot jsou provedeny podle vztahů uvedených v druhé kapitole. Jak z uvedené kapitoly vyplývá, jsou tyto vztahy odvozené pro frézování rovinné plochy kulovou frézou, a proto jsou závislosti jednotlivých měřených parametrů na efektivní řezné rychlosti v této práci řešeny pouze pro rovinnou plochu (plocha 1). Vypočtené hodnoty podle uvedených vztahů by u tvarově složitějších ploch, jako zaoblená nebo sedlová plocha, neodpovídaly skutečným hodnotám.



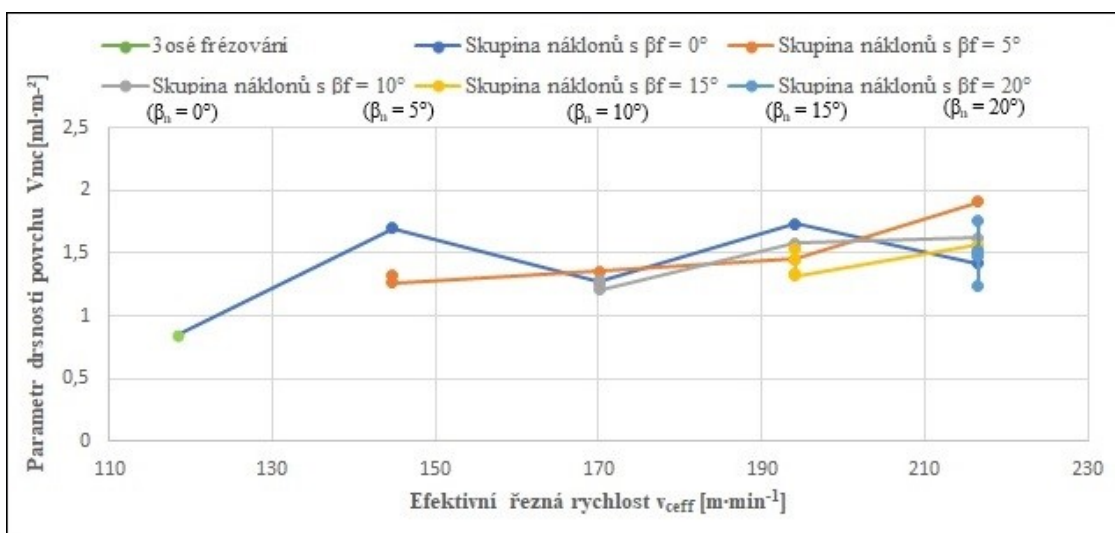
Obrázek 6.20 – Závislost parametru drsnosti Spk na změně efektivní řezné rychlosti v_{ceff} ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = a_e = 0,08 \text{ mm}$)



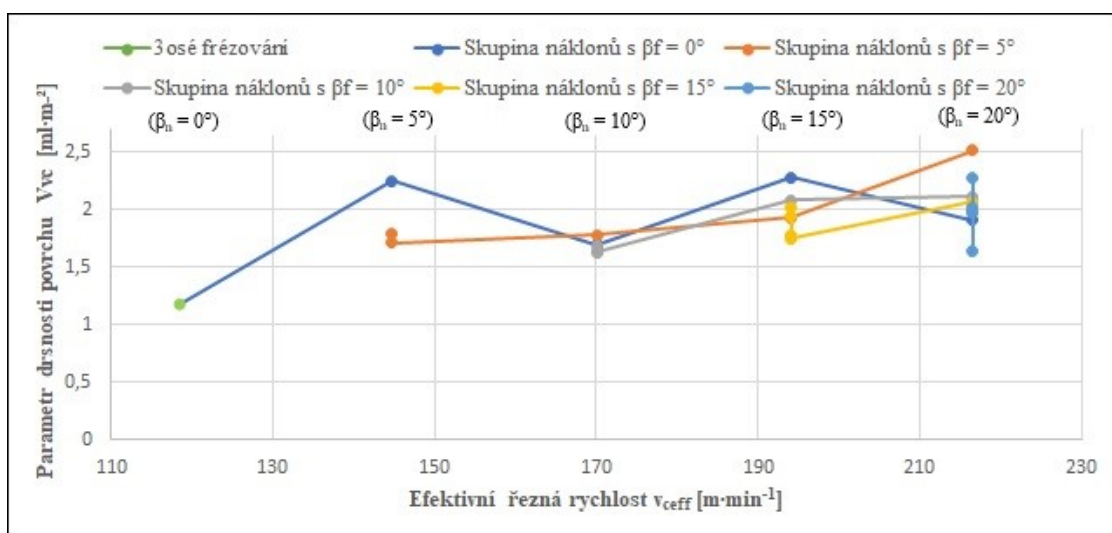
Obrázek 6.21 – Závislost parametru drsnosti Svk na změně efektivní řezné rychlosti v_{ceff} ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = a_e = 0,08 \text{ mm}$)



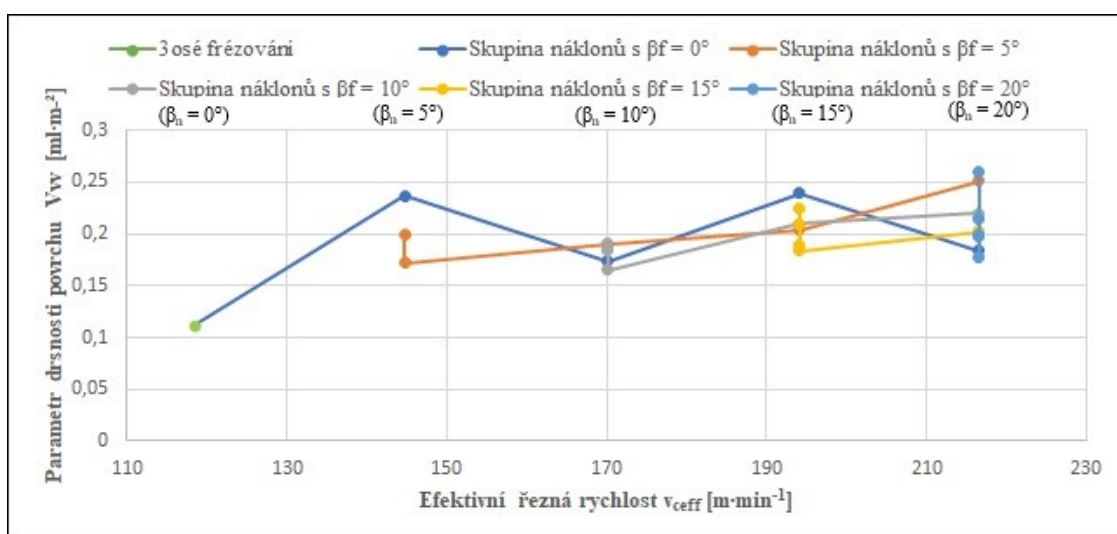
Obrázek 6.22 – Závislost objemového parametru Vmp na změně efektivní řezné rychlosti v_{ceff} ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = a_e = 0,08 \text{ mm}$)



Obrázek 6.23 – Závislost objemového parametru V_{mc} na změně efektivní řezné rychlosti v_{ceff} ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = a_e = 0,08 \text{ mm}$)



Obrázek 6.24 – Závislost objemového parametru V_{vc} na změně efektivní řezné rychlosti v_{ceff} ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = a_e = 0,08 \text{ mm}$)



Obrázek 6.25 – Závislost objemového parametru V_{vw} na změně efektivní řezné rychlosti v_{ceff} ($d = 6 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $v_c = 329 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = a_e = 0,08 \text{ mm}$)

V grafech závislostí měřených parametrů drsnosti na změně efektivní řezné rychlosti odpovídá každá řada grafu jedné skupině náklonů, rozdělených podle úhlu ve směru kolmém na posuv β_f . Tento úhel ve směru kolmém na posuv je znázorněn nad odpovídajícími místy v grafu. Na ose X je pak vynesena hodnota efektivní řezné rychlosti odpovídající výpočtu pro jednotlivé kombinace náklonů ve směru posuvu β_f a ve směru kolmém na posuv β_n . Na ose Y jsou hodnoty naměřeného parametru drsnosti.

Výpočty jsou provedeny na základě vztahů z kapitoly týkající se změn efektivních řezných průměrů frézy. Z důvodu, že dané vztahy jsou odvozeny pouze pro jeden úhel vyklonění osy nástroje, nikoli pro kombinaci obou úhlů, je počítáno vždy s tím úhlem, který projevuje v této kombinaci větší změnu polohy osy nástroje. Proto se při náklonech ve směru kolmém na posuv $\beta_n = 20^\circ$ neprojevuje změna efektivní řezné rychlosti.

Závislosti efektivní řezné rychlosti se s ohledem na měřené parametry velmi podobají. Hodnoty měřených parametrů v závislosti na efektivní řezné rychlosti nabývají spíše souměrných hodnot, není vykazován stálý výrazný růst ani pokles hodnot, na základě čehož lze konstatovat, že řezná rychlost výrazně neovlivňuje měřené parametry.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo porovnání jednotlivých změn polohy osy nástroje vůči obrobené ploše pro úhly ve směru posuvu β_f a ve směru kolmém na posuv β_n v závislosti na měřených parametrech drsnosti povrchu a určení závislosti efektivní řezné rychlosti v_{ceff} , která vyplývá z hodnot efektivního řezného průměru d_{eff} , jehož velikost je přímo ovlivňována změnou polohy osy nástroje. První část práce byla zaměřena na obecnou charakteristiku 3osého a 5osého frézování, změny polohy osy nástroje v jednotlivých metodách frézování a charakteristiku profilových a plošných parametrů drsnosti pro hodnocení povrchu. V další části se nachází popis experimentálního měření a vyhodnocení naměřených dat.

K experimentálnímu měření byla použita bezdotyková metoda pro měření drsnosti povrchu. Vzorky byly vyrobeny z dobře obrobitelné slitiny hliníku. Pro experimentální část práce bylo vyrobeno 25 stejných vzorků, které byly vyrobeny při různých změnách polohy osy nástroje. První vzorek byl vyroben klasickou metodou 3osého frézování a ostatní vzorky metodou 5osého frézování, kdy byl každý vzorek vyroben při jiné změně polohy osy nástroje.

Experimentální vzorek byl navržen jako tvarově složitá součást tak, aby bylo možné provést porovnání měřených parametrů při jednotlivých změnách polohy osy nástroje vůči různým typům ploch. V případě této práce byly porovnávané parametry měřeny na třech různých plochách, kterými jsou rovinná plocha, plocha se zaoblenými kraji a sedlová plocha.

Při použití moderního měřicího přístroje Alicona bylo umožněno komplexnějšího hodnocení obrobeného povrchu. Z tohoto důvodu je místo klasického hodnocení drsnosti povrchu pomocí profilových parametrů věnováno více pozornosti prostorové analýze povrchu, kde se otevírají nové možnosti pro hodnocení struktury. Tato práce je zaměřena zejména na porovnávání objemových parametrů V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} a V_{vv} , které vycházejí z křivky nosného podílu a vedou k podrobnějšímu poznání vlastností povrchu s ohledem na materiál, který lze dalším opotřebením odstranit z povrchu při zachování funkční plochy, nebo z hlediska množství maziva, které je možno na povrchu zachytit. Dalšími porovnávanými parametry je parametr udávající průměrnou výšku vrcholů nad jádrem drsnosti Spk a parametr udávající průměrnou hloubku prohlubní pod jádrem drsnosti Svk . Porovnání profilových parametrů drsnosti Ra a Rz je součástí přílohy.

Analýzou naměřených hodnot byly stanoveny náklony osy nástroje vůči obrobku, které vykazují nejnížší a nejvyšší hodnoty při frézování rovinné, zaoblené i sedlové plochy. Pro každou plochu bylo stanoveno více náklonů, které vykazovaly podobné hodnoty, a to z důvodu, že je zapotřebí uvažovat s nejistotou měření, která se projevuje u každého měření a ovlivňuje tak výslednou hodnotu. V práci není s nejistotou měření počítáno, ale pouze uvažováno z důvodu nedostatku opakování jednoho měření.

Při analýze ploch dosahovalo velmi dobrých hodnot 3osé frézování, a to pro frézování všech měřených ploch. Pro rovinnou a zaoblenou plochu dokonce 3osé frézování vykazovalo nejnížší hodnoty.

Z celkového hlediska vykazovaly u 5osého frézování nejefektivnější hodnoty náklony $\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$; $\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$; $\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$; $\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$; a $\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 15^\circ$ a nejméně efektivní hodnoty byly dosahovány při $\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$; $\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$; $\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$; $\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$ a $\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$.

Při porovnání závislosti efektivní řezné rychlosti s ohledem na měřené parametry lze konstatovat, že se průběhy jednotlivých parametrů velmi podobají, a proto je patrné, že řezná rychlost výrazně neovlivňuje měřené parametry.

Vzhledem k tomu, že se v poslední době klade na kvalitu povrchu větší důraz, než tomu bylo dříve, pro další průběh výzkumu v této oblasti bych navrhoval prozkoumat vliv parametrů drsnosti v závislosti na jiném parametru, kterým by mohl být například posuv nebo hloubka řezu, popřípadě je spousta jiných možností měřených parametrů drsnosti, které mohou být prozkoumány a porovnány.

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Markovi Sadílkovi, Ph.D. za jeho vstřícnou pomoc, odborné rady a připomínky, kterých mi bylo při tvorbě této diplomové práce poskytnuto.

Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům z katedry matematiky a deskriptivní geometrie za jejich ochotu a zájem podílet se na výsledcích této práce.

Tato diplomová práce byla vypracována v rámci projektu „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Děkuji i mé rodině, která mi byla morální oporou po celou dobu studií, a to i při vypracování této diplomové práce.

Použitá literatura

- [1] BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; ČEP, R.; PETRŮ, J. *Progresivní metody v obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [2] ZELENÝ, J. *Numerically controlled machine tools and accessories*. Praha: ČVUT Praha, 1999, 165 s.
- [3] SADÍLEK, M. *Výzkum změny polohy osy nástroje při víceosém frézování: Habilitační práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 150 s.
- [4] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. 1.vyd.. Praha: Sandvik CZ a Scientia, 1997. 841 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [5] JASPAR, J. *Nové hvězdy mezi frézami pro nástrojárny a výrobce forem*: MM Průmyslové spektrum, 2003, č. 5, 46 s. ISSN 1212-2572.
- [6] APRO, K. *Secret of 5-Axis Machining*. 1st Edition. Industrial Press, Inc. New York, NY, USA, 2008. ISBN 978-0-8311-3375-7.
- [7] CAD CAM SYSTEMS. *Frezování v 5 osách – vše o programování víceosých frézovacích center: Kinematika strojů*. [online]. Brno: CAD CAM SYSTEMS, s.r.o. [cit. 2019-01-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.frezovani-5os.cz/kinematika-stroju/>>.
- [8] SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému*. Disertační práce. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 s.
- [9] DVOŘÁČEK, J. *Analýza silového zatížení řezného nástroje při pětiosém frézování*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009, 92 s.
- [10] BOUJELBENE, M.; MOISAN, A.; BOUZID, W.; TORBATY, S. *Variation Cutting Speed on the Five Axis Milling*. 2nd Edition, JAMME – Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007
- [11] PRÁŠIL, T. *Posun hranic užití HM monolitních fréz*. MM – Průmyslové spektrum, září 2007, 123 s. ISSN 1212-2572
- [12] CHEN, J.S.; HUANG, Y.K.; CHEN, M.S., *A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling proces*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 1077-1084.

- [13] SADÍLEK, M.; FOJTÍK, F.; SADÍLKOVÁ, Z.; KOLAŘÍK, K.; PETRŮ, J., *A Study of Effects of Changing the Position of the Tool Axis to the Machined Surface*. Transaction of FAMENA, Vol. 39, No. 2, Zagreb 2015, pp. 33-46. ISSN: 1333-1124.
- [14] ČSN EN ISO 4287, Změna A1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Struktura povrchu, Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 4 s.
- [15] ČSN EN ISO 25178-2, *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 52 s.
- [16] LEACH, R. *Characterisation of Areal Surface Texture*. Berlin: Springer, 2013, ISBN 978-3-642-36457-0
- [17] PETŘKOVSKÁ, L.; PETRŮ, J., *Engineering Metrology and Assembly*. VŠB – Technical university of Ostrava, 2012, p. 106
- [18] PERNIKÁŘ, J.; VAČKÁŘ, J.; TYKAL, M., *Jakost a metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.
- [19] ČSN EN ISO 16610-21, *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Filtrace – Část 21: Lineární profilové filtry: Gaussovy filtry*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 28 s.
- [20] ŠPERKA, P., *Struktura povrchů vybraných strojních součástí*. [online]. Brno: VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, ústav konstruování. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z WWW: <http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_t_echnologii_obrazeni.pdf>
- [21] SADÍLEK, M., SADÍLKOVÁ, Z., *Učební text: Počítačová podpora procesu obrábění* [online]. Ostrava, 2012, 149 s., [cit. 2019-03-05]. Dostupné z WWW: <http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20obrazeni.pdf>
- [22] SADÍLEK, M., *Hodnocení stavu obrobeného povrchu po víceosém frézování*. [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní. 2013, 35 s., [cit. 2019-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://docplayer.cz/4871777-Hodnoceni-stavu-obrobeneho-povrchu-po-vicosem-frezovani.html>>
- [23] VEČEŘA, O., *Zvyšování přesnosti při frézování tvarových ploch*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 51 s.

- [24] SANDVIK COROMANT, *Nástroje – Sandvik Coromant*. [online], [cit. 2019-03-05]. Dostupné z WWW: <<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/tools.aspx>>
- [25] SERVUS, T., *Trendy upínání řezných nástrojů*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 77 s.
- [26] DIGITOVÁRNA, *Komplexní hodnocení jakosti povrchu*. [online], [cit. 2019-04-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.digitovarna.cz/clanek-84/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu.html>>
- [27] ALICONA, *Dimensional Metrology & Roughness Measurement – InfiniteFocus*. [online], [cit. 2019-04-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.alicon.com/products/infinitefocus/>>
- [28] DANZL, R., HELMLI, F., SCHERER, S., *Focus Variation – a New Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology*. [online], Slovenia: Ljubljana, 2009 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2009/PDF/P52.pdf>>
- [29] DANZL, R., HELMLI, F., SCHERER, S., *Automatic Measurement of Calibration Standards with Arrays of Hemi-Spherical Calottes*. Proc. 11th Int. Conf. On Metrology and Properties of Engineering Surface, 2007, 41-46.
- [30] JIANG, X., SCOTT, P. J., WHITEHOUSE, D. J., BLUNT, L., *Paradigm Shifts in Surface metrology, Part II, The Current Shift*. In: *Proceedings of the Royal Society*. Vol. 463, No. 2085, 2007, pp. 2071-2099.
- [31] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobu (DPS): Struktura povrchu: Profilová metoda. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha, 1997, 15 s.
- [32] HLAVÁČEK, P., *Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrnných materiálů*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 48 s.
- [33] PODJUKLOVÁ, J., *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební text, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1994, 71 s. ISBN 80-7078-235-8.
- [34] ELUC, *Kontrola drsnosti povrchu – Základní pojmy*. [online], [cit. 2019-04-04], Dostupné z WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>>
- [35] MM Průmyslové spektrum, *Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu*. [online], [cit. 2019-04-07], Dostupné z WWW: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>>

- [36] TICHÁ, Š., *Strojírenská metrologie – Část 1*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2004, 110 s.
- [37] KLICHOVÁ, D., *Identifikace topografie povrchu materiálů vytvořených hydroabrazivním proudem*. Ostrava 2017, 131 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [38] TUREK, P., *Více parametrové hodnocení povrchů součástí*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 57 s.
- [39] JIANG, X., DAVID. J., WHITEHOUSE, D. J., *Technological Shifts in Surface Metrology*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61, 2012, pp. 815-836, ISSN: 0007-8506
- [40] ČSN EN ISO 25178-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 32: Specifikace operátorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 20 s.
- [41] FEHRENBACHER, C., HOERL, L., BAUER, F., HASS, W., *Description of the Pumping Rate of Shaft Counterfaces in the Sealing System Radial Lip Seal Using the 3D Parameters of ISO 25178*. Tribology Online, Japanese Society of Tribologists. 2016, pp. 69-74, ISSN 1881-2198.
- [42] TOWNSEND, A., PAGANI, L., SCOTT, P., BLUNT, L., *Areal Surface Texture Data Extraction from X-ray Computed Tomography Reconstructions of Metal Additively Manufactured Parts*. Precision Engineering, vol. 48, 2017, pp. 254-264
- [43] MM Průmyslové spektrum, *Výškové parametry textury povrchu*. [online], [cit. 2019-04-16], Dostupné z WWW: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>>
- [44] MM Průmyslové spektrum, *Prostorové hodnocení struktury povrchu*. [online], [cit. 2019-04-16], Dostupné z WWW: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/prostorove-hodnoceni-struktury-povrchu.html>>
- [45] MM Průmyslové spektrum, *Standardní prostorové hodnocení textury povrchu*. [online], [cit. 2019-04-16], Dostupné z WWW: <<https://www.mmspektrum.com/clanek/standardni-prostorove-hodnoceni-textury-povrchu.html>>
- [46] SURFACE METROLOGY GUIDE, *Areal Field Parameters*. [online], [cit. 2019-04-17], Dostupné z WWW: <<https://guide.digitalsurf.com/en/guide-areal-field-parameters.html>>

- [47] MICHIGAN METROLOGY, LLC, *3D S Parameters – Spatial Parameters*. [online], [cit. 2019-04-17], Dostupné z WWW: <https://www.michmet.com/3d_s_spatial_parameters.htm>
- [48] HAVLÍK, L., *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 88 s.

Seznam příloh

- Příloha A – Porovnávaná a doplňující naměřená data pro rovinnou plochu (plocha 1), včetně vypočtených hodnot efektivního průměru d_{eff} a efektivní řezné rychlosti v_{ceff}
- Příloha B – Porovnávaná a doplňující naměřená data pro zaoblenou plochu (plocha 2)
- Příloha C – Porovnávaná a doplňující naměřená data pro sedlovou plochu (plocha 3)
- Příloha D – Grafické porovnání doplňujících parametrů drsnosti
- Příloha E – Závislosti doplňujících parametrů drsnosti na efektivní řezné rychlosti v_{ceff}
- Příloha F – Popis obráběcího centra DMU 50